

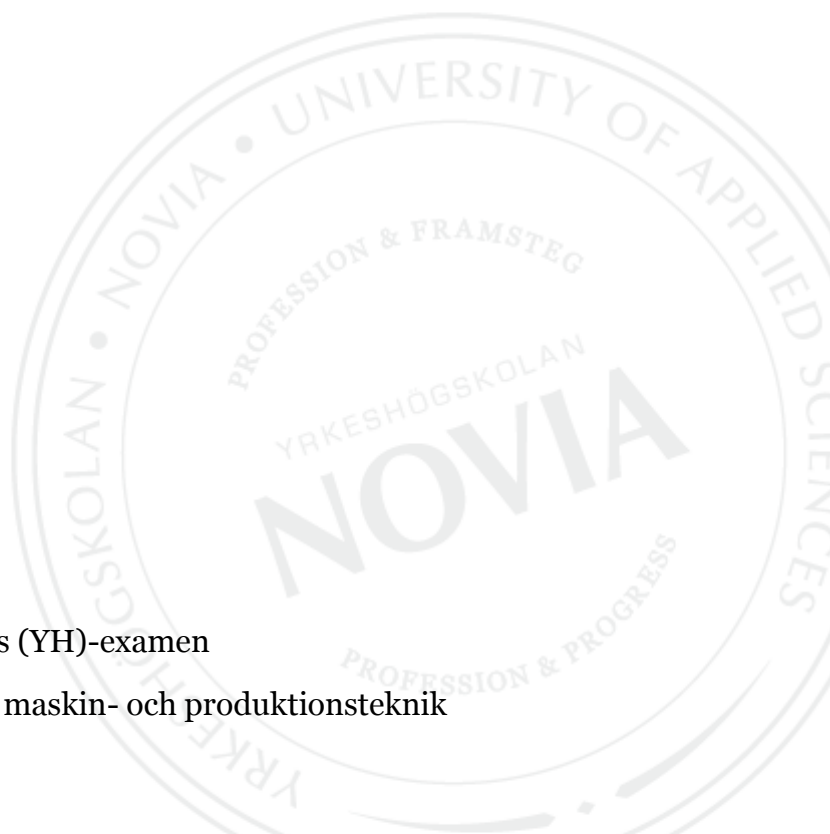
Konstruktion av ställbar arbetsplattform för motorcell

André Ahlskog

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Utbildningsprogrammet för maskin- och produktionsteknik

Vasa 2014



EXAMENSARBETE

Författare: André Ahlskog
Utbildningsprogram och ort: Maskin- och produktionsteknik, Vasa
Inriktningsalternativ: Maskinkonstruktion
Handledare: Kaj Rintanen

Titel: *Konstruktion av ställbar arbetsplattform för motorcell*

Datum: 20.4.2014 Sidantal: 41

Abstrakt

Detta examensarbete har utförts i samarbete med Wärtsiläs motorlaboratorium på Vasklot. Uppgiften var att konstruera en ställbar arbetsplattform till en befintlig motorcell. Plattformen skulle vara anpassningsbar till olika motortyper som skall testas och skulle även vara lätt och smidig att montera.

Syftet med arbetet var att konstruera en arbetsplattform vars höjd, bredd och längd är justerbar så att denna går att anpassa till olika motorer. Detta för att minska på kostnader som uppstår på grund av att man är tvungen att modifiera befintliga plattformar vid motorbyten. Arbetet innebar 3D-modellering av den nya plattformen, hållfasthetsberäkningar och tillverkningsritningar för denna samt en analys med hjälp av finita element metoden.

Resultatet blev en komplett 3D-modell av den nya plattformen samt tillhörande tillverkningsritningar och hållfasthetsberäkningar. Resultatet av finita element analysen presenteras i slutet av detta arbete.

Språk: svenska Nyckelord: plattform, FEM, aluminium

BACHELOR'S THESIS

Author: André Ahlskog
Degree programme: Mechanical and Production Engineering, Vasa
Specialization: Mechanical Construction Engineering
Supervisor: Kaj Rintanen

Title: *Design of adjustable work platform for engine test cell*

Date: 20 April 2014 Number of pages: 41

Abstract

This Bachelor's thesis work has been carried out in collaboration with Wärtsilä's engine laboratory in Vaskiluoto. The task was to design an adjustable work platform for an existing engine test cell. The work platform was to be adaptable to different types of engines that are to be tested. The platform also had to be lightweight and easy to assemble/disassemble.

The aim of this thesis was to design a work platform whose length, width and height are adjustable so that it can be adapted to different engines. This is to reduce the costs that arise because of the need to modify existing work platforms when a test engine is being replaced. The task included 3D-modelling of the new platform, strength calculations and manufacturing drawings. An analysis using the finite element method was also to be done.

The result of this task was a complete 3D-model of the new platform, manufacturing drawings and associated strength calculations. The results of the finite element analysis are presented at the end of this thesis.

Language: Swedish Key words: platform, FEM, aluminium

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: André Ahlskog
Koulutusohjelma ja paikkakunta: Kone- ja tuotantotekniikka, Vaasa
Suuntautumisvaihtoehto: Koneensuunnittelu
Ohjaajat: Kaj Rintanen

Nimike: *Säädettävän työtason suunnittelu moottorikoeajotilaan*

Päivämäärä: 20.4.2014 Sivumäärä: 41

Tiivistelmä

Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Wärtsilä Vaskiluoto moottorilaboratorion kanssa. Tehtävänä oli säädettävän työtason suunnittelu moottorikoeajotilalle. Työtason piti olla mukautettavissa erilaisia moottoreita varten. Työtason piti myös olla kevyt ja helppo asentaa/purkaa.

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella työtaso, jonka pituus, leveys ja korkeus ovat säädettävissä, jotta se voidaan mukauttaa erilaisia moottoreita varten. Tarkoituksena on vähentää kustannuksia, jotka syntyvät siitä, että on pakko muokata koeajotilan olemassa olevia työtasoja, kun testimoottori vaihdetaan. Tehtävänä oli 3D-mallinnus uudelle työtasolle, lujuuslaskelmat, valmistuspiirustuksia ja analyysi käyttäen elementtimenetelmää.

Tuloksena oli täydellinen uuden työtason 3D-malli sekä siihen liittyvät valmistuspiirustukset ja lujuuslaskelmat. Elementtimenetelmän tulos esitetään tämän opinnäytetyön lopussa.

Kieli: ruotsi Avainsanat: työtaso, FEM, alumiini

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte.....	1
1.3	Avgränsningar	2
1.4	Företagsbeskrivning	2
1.5	Disposition.....	2
2	Teori	3
2.1	Konstruktionsdimensionering.....	3
2.2	Materialval.....	5
2.2.1	Stål.....	7
2.2.2	Aluminium.....	9
2.3	Tillverkningsmetoder	15
2.3.1	Svetsning	15
2.3.2	TIG – Svetsning.....	16
2.3.3	Aluminiumsvetsning.....	19
2.4	Finita element metoden	23
3	Metod.....	26
3.1	Plattformsmoduler	26
3.2	Bärande balk	30
3.3	Infästning	31
4	Resultat	32
4.1	FEM-analys av modul	33
4.2	FEM-analys av bärande balk och infästning	35
4.3	Slutgiltig design.....	38
5	Diskussion	39
5.1	Plattformens utformning.....	39
5.2	FEM – analysen	40
5.3	Fortsatt utveckling	40
	Källförteckning.....	41

1 Inledning

Detta examensarbete behandlar konstruktionen av en ställbar arbetsplattform till en motorcell i Vaskiluoto Engine Laboratory. Arbetet omfattar en teoridel där grundläggande fakta om konstruktionsteknik, materialval, tillverkningsmetoder och FEM-analys tas upp. Därefter följer en del i vilken tillvägagångssättet för konstruktionen beskrivs. Arbetet avslutas med en resultatdel i vilken resultaten från finita element analyserna presenteras samt en diskussionsdel i vilken uppgiften och resultatet diskuteras som helhet.

1.1 Bakgrund

Examensarbetet utfördes i samarbete med Wärtsiläs motorlaboratorium på Vasklot. Idén till arbetet uppkom i slutet av sommaren 2013 när olika alternativ till examensarbetsämnen diskuterades. Höjden och storleken på plattformen som behövs i motorcellen varierar ganska kraftigt beroende på hurdan motor som testas för tillfället. I laboratoriets motorceller byts testmotorer ganska ofta och med ställbara plattformar skulle man spara tid och pengar vid motorbyte, i stället för att vara tvungen att modifiera befintliga plattformar varenda gång motor byts. En ställbar plattform skulle också vara enkel att helt och hållet avlägsna från motorcellen ifall underhållsarbete som kräver detta skall utföras i cellen.

1.2 Syfte

Syftet med detta arbete är att konstruera en arbetsplattform med ställbar höjd och bredd. Längden på plattformen skall också gå att justera. Plattformen skall kunna anpassas till olika motortyper som kan komma att installeras i laboratoriets motorceller. Arbetet kommer att innebära design, ritningar och hållfasthetsberäkningar för plattformen. En analys med hjälp av finita element metoden kommer också att utföras. 3D-modellen, ritningar och den strukturella analysen av plattformen kommer att utföras i Siemens NX 9.0

1.3 Avgränsningar

Plattformen konstrueras utifrån befintliga mått som har förutbestämts utgående ifrån motorcellens mått samt vilka olika typer av motorer som kommer att testas där. Detta innebär alltså att plattformens maximala mått såsom längd, bredd och höjd är förutbestämda. Till arbetet hör att designa en plattform så att det blir möjligt att höja och sänka samt ändra på plattformens bredd och längd. Till plattformen hör även konstruktion av skyddsräcken och trappa. För att förenkla tillverkning samt minska på kostnader kommer endast standardmått på balkar och andra komponenter att användas.

1.4 Företagsbeskrivning

Wärtsilä är ett marknadsledande finländskt aktiebolag inom marin- och energiindustrin. I nuläget har Wärtsilä fler än 18700 anställda i över 70 länder. År 2012 uppgick nettoomsättningen till 4725 miljoner euro och av detta gick 188 miljoner till forskning och utveckling (dvs. 4 %).

De huvudsakliga produkterna innefattar stora låg- och medelvarviga tvåtakts- och fyrtaktsmotorer. Wärtsilä tillverkar även olika drivanordningar till fartygsindustrin, propellrar, frekvensomvandlare, el- och automationssystem, anordningar för avgasrening etc. Wärtsiläs största produktionsanläggningar finns i Vasa samt Trieste, Italien. (This is Wärtsilä)

1.5 Disposition

I dispositionen redogörs i korthet vad de olika delarna och kapitlen av arbetet innehåller.

Kapitel 1 innehåller en kort presentation av arbetet, alltså bakgrunden till arbetet, syftet, kraven för hur plattformen skall tillverkas samt hur arbetet avgränsas. Därefter följer en beskrivning av företaget.

Kapitel 2 ger en teoretisk bakgrund till arbetet. Teoridelen innehåller bland annat en del om konstruktionsteknik och om materialval. Därtill innehåller kapitlet även information om konstruktionsmetoder som kommer att användas i detta arbete.

Kapitel 3 redogör för vilka arbetssätt och metoder som användes för att utföra detta arbete.

Kapitel 4 innehåller en presentation av resultatet som har uppnåtts genom detta arbete

Kapitel 5 sammanfattar hela arbetet med en slutdiskussion där resultat och eventuella frågor/problem som uppstått under arbetets gång diskuteras. I detta kapitel tillkommer även eventuella förslag till en fortsättning på arbetet.

2 Teori

2.1 Konstruktionsdimensionering

Vid planering av en konstruktion eller maskin, d.v.s. när man bestämmer dess utformning, material och mått, ska det göras för att undvika konsekvenser såsom funktionsstörningar och skador. Att dimensionera en konstruktion innefattar förstås hållfasthetsdimensionering eftersom det är ett huvudsakligt mål att konstruktionen skall vara hållbar. Dimensionering innefattar dock många andra faktorer än hållfasthetsberäkningar som även de kan bli avgörande för hur konstruktionen utformas. (Olsson, 2006, s. 9)

Dimensioneringsmetoder skiljer sig också för olika materialtyper. Till exempel när man konstruerar med polymera material bör man ta i beaktande både spänningsrelaxation och kallkrypning. Material som är spröda dimensioneras i sin tur med hjälp av brottmekaniska metoder. När man använder sig av material med speciella eller mycket goda egenskaper (s.k. högprestanda material) är det viktigt att utnyttjandegraden av materialet är hög så att konstruktionen blir lönsam ur en ekonomisk synvinkel. Ett högt materialpris kan dock oftast kompenseras med tanke på materialåtgång och materialegenskaper. (Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 333)

De vanligaste kriterierna kan listas enligt följande:

- Hållfasthet

Den statiska hållfastheten måste vara tillräcklig, d.v.s. spänningarna som uppstår i konstruktionen måste ligga tillräckligt långt under sträck- och brottgräns. Vanligen blir dock den dynamiska hållfastheten den kritiska. Den dynamiska hållfastheten kan delas upp i High Cycle Fatigue, HCF, (Utmattning) som innebär många lastcykler ($>10^6$) och Low Cycle Fatigue, LCF (”Töjningsutmattning”) som innebär ett lägre antal cykler som kan vara mera slitsamma. Ett exempel kan vara en förbränningsmotor där vevaxelns rotation är utsatt för HCF eftersom den under motorns livstid utsätts för långt över 10^6 belastningscykler. Uppstart av motorn kan i sin tur anses vara LCF eftersom antalet är relativt lågt (<10000).

- Deformation

Trots att spänningarna i konstruktionen kan vara obetydliga för hållfastheten på konstruktionen kan både permanenta och elastiska deformationer utgöra problem

- Temperatur

Många konstruktioner blir upphettade antingen för att de utsätts för värme/kyla eller för att de själva genererar värme. Förhöjd eller sänkt temperatur kan i sin tur få en mängd olika följder. Till exempel försämras ett materials hållfasthet vid högre temperatur. Hög temperatur kan också orsaka spänningar i material och även krypning av material. Väldigt låg temperatur leder i sin tur sprödhet hos många material.

- Korrosion, nötning

Exempelvis en oskyddad metallkonstruktion börjar rosta väldigt fort beroende på omgivningen. Nötning kan leda till glapp och i värsta fall till att någonting går sönder. Konstruktioners hållfasthet försämras också av korrosion och nötning.

- Vibration

Maskiner och konstruktioner blir utsatta för vibrationer eller orsakar själva vibrationer. Detta kan orsaka många olika problem. Bland annat så kan maskinen/konstruktionen skadas eller i värsta fall haverera på grund av utmattande vibrationer. Kringliggande utrustning kan också påverkas av dessa vibrationer. Vibrationer orsakar också mycket ljud.

- Tillverkning

En övervägande del inom maskinkonstruktion. En konstruktion bör planeras så att den går att tillverka/bygga och att detta inte blir för kostsamt. Hur en konstruktion tillverkas måste alltid tas i beaktande.

- Ergonomi

Konstruktionen/maskinen bör vara anpassad så att personerna som utför arbete på/vid denna inte utsätts för stora belastningar eller krävande rörelser som kan orsaka belastningsskador och dylikt.

Kriterierna för det som konstrueras blir oftast en kombination av ovanstående lista. Dimensioneringen och planeringen för konstruktionen görs utgående från de kriterier som man fastställt. Därtill tillkommer självklart den ekonomiska aspekten för konstruktionen. De olika faktorerna som man tar i beaktande när man planerar konstruktionen kan förstås vara motsägelsefulla. (Olsson, 2006, s. 9-10)

Mekaniskt belastade konstruktioner kan konstrueras med avseende på styvhet eller styrka. Med detta menas att konstruktionen kan designas som styv eller mjuk. Mjuka konstruktioner har den fördelen att de kan uppta stora deformationer utan att spänningarna i konstruktionen blir farliga. Mjuka konstruktioner kan också oftast konstrueras med låg egenvikt. Ett exempel på mjuka konstruktioner är flygplansvingar. Med styvt konstruerade vingar skulle dessa bli alltför tunga. Istället får vingarna ”deformeras” och följa med belastningen för att minska på farliga spänningar. På detta vis minskar också risken för utmattningsskador. Med en styv konstruktion blir deformationen mycket liten men spänningarna och vikten på konstruktionen blir större. Vid dynamisk last arbetar en styv konstruktion underkritiskt, dvs. under den lägsta egenfrekvensen. En mjuk konstruktion arbetar i sin tur överkritiskt. (Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 337)

2.2 Materialval

Inom materialindustrin är utvecklingen kraftig, inte enbart när det kommer till konstruktionsstål utan även gällande material för elektronik etc. Stål är fortfarande det material som är det mest använda men användningen av aluminium och polymera material ökar i snabb takt. Vilket material som väljs har stor inverkan på konstruktionens utformning och tillverkning och bör därför tas i beaktande i ett tidigt skede av planeringen. Hurdana belastningar en konstruktion utsätts för beror mycket på vilket material som används och hur dess geometriska form ser ut. Därtill påverkas egenskaperna hos materialet beroende på vilken metod som används vid tillverkning. (Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 307-308)

När man väljer material för en konstruktion finns det många saker man måste ta hänsyn till. Nedan följer en lista på några av dessa aspekter:

- Mekaniska egenskaper såsom sträckgräns, brottgräns, slagseghet etc.
- Fysikaliska egenskaper, exempelvis densitet, längdutvidgning, värmeledning etc.
- Tillverkningsmetod
- Bearbetbarhet
- Fogningsmetoder
- Materialets miljöpåverkan
- Påverkan av omkringliggande miljö på materialet (temperatur, fuktighet, korrosion etc.)
- Materialkostnader
- Tillverkningskostnader
- Tillgänglighet

Det kan också finnas orsaker till att byta till en ny typ av konstruktionsmaterial. Till exempel så kan ett annat material ge lättare och/eller smidigare konstruktion. Detta kan i sin tur leda till minskad åtgång av energi. En annan fördel med att byta konstruktionsmaterial kan vara minskad kostnad för produktion om det nya materialet kan användas med mindre tillverkningsskeden och mindre bearbetning. Andra fördelar kan vara minskade kostnader för materialet, behovet av skydd mot korrosion kanske minskar och miljöpåverkan blir mindre. Minskad materialvikt är fördelaktigt både ur ekonomisk och miljömässig synvinkel. Exempelvis för fordons- och flygindustrin kan lägre konstruktionsvikt ge stor vinning genom att lägre vikt kräver mindre bränsle. (Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 309-310)

Man bör dock i produktutvecklingssammanhang ta i beaktande att ändringen av nya material på grund av korrosion, nötning och utmattning är en långsam process. Problem med en produkt som orsakats av ett dåligt materialval kanske dyker upp först efter en längre tids användande. (Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 310)

2.2.1 Stål

Som konstruktionsmaterial är stål i dagens läge överlägset. Detta beror på dess låga pris i kombination med goda hållfasthetsegenskaper samt goda bearbetnings- och fogningsmöjligheter. Omsmältning och framställning av stål från skrot är sedan länge en använd metod för återvinning. Stål består av järn med en kolhalt på upp till 1.6% och därtill en mängd olika legeringsämnen

(Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 312). Vid rimliga belastningar är användningen av vanliga konstruktionsstål (kolhalt 0,1-0,6 %) överlägset vanligast. Sträckgränsen för dessa stål rör sig kring 210-350 MPa. Högre kolhalt i stålet ger högre sträckgräns och hårdhet men bearbetnings- och fogningsegenskaperna blir lidande. Också materialets seghet blir sämre med ökande kolhalt.

Proportionen mellan sträckgräns och brottgräns kan användas som mått på marginal till haveri vid överbelastning med plastisk deformation.

$$\sigma_s / \sigma_b = 0,5-0,6 \quad (\text{Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 312})$$

Stålet kan seghärdas för att få förbättrad sträck- och brottgräns i hela godset. En tumregel för sammanhanget mellan materialets hårdhet (HB, Brinellhårdhet) och materialets brottgräns kan räknas enligt följande:

$$\sigma_b [\text{MPa}] = 3,5 \text{HB} \quad (\text{Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 312})$$

Olika värmebehandlingsmetoder kan användas för att bilda hårda ytskikt på materialet. Detta för att förbättra utmattningshållfasthet och slitstyrka. Med hjälp av ythärdning införs tryckspänningar i materialets ytskikt. Detta motverkar även sprickpropagering från defekter vid materialets yta. Ythärtningsmetoder kan exempelvis vara:

- Sätthärdning är en diffusionsprocess som innebär att detaljen som härdas packas in i kol och värmebehandlas. Denna metod används bland annat för kugghjul för att få hög slitstyrka på kuggarna samt för att få dem att tåla höga kontakttryck. Härddjupet är direkt bundet till härddtiden vilket innebär att om man är ute efter stort härddjup är detta en ganska kostsam metod.
- Induktionshärdning är en metod som kan användas för enklare detaljgeometrier. Metoden går ut på att en växelströmsspole lindas så att den omringar detaljen som skall härdas. Denna metod ger max härddjup på ca 6-10mm. Härddjupet är beroende på temperatur och frekvens.
- Nitrokarburering är en lågtemperaturprocess som bildar ett mycket tunt ytskikt på materialet. Fördelarna med nitrokarburering är att det är en snabb och billig metod. Dessutom så är formförändringarna i ytan så små att efterbehandling inte är nödvändig. (Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 312-313)

Stål kan legeras för att uppnå önskade egenskaper såsom förbättrad hållfasthet, skärbarhet, svetsbarhet, korrosionsmotstånd etc. Ett ståls hårdhet kan exempelvis förbättras genom att tillsätta legeringsämnen såsom mangan, krom, nickel och molybden. (Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 313-314)

Utvecklingen av stållegeringar är ännu väldigt intensiv. Speciellt inom kategorin höghållfasta och ultra höghållfasta stål (sträckgräns 450 MPa-750 MPa och >750 MPa) eftersom dessa ståltyper har börjat nyttjas i allt större grad. Ett av dessa stål är HSLA (high strength low alloy). HSLA är ett låglegerat finkornigt stål med låg kolhalt. Dess egenskaper är bland annat hög sträckgräns (350-450 MPa), hög seghet och bra svetsbarhet. En annan typ av höghållfasta stål är borstål i vilka man tillsatt en liten del Bor (ca 0,002%). Dessa stål kan ha en sträckgräns upp till 900 – 1500 MPa.

Förhållandet mellan sträck- och brottgräns kan i vissa fall ligga så högt som $\sigma_s / \sigma_b = 0,9$ för dessa höghållfasta stål. Detta är någonting man måste vara medveten om eftersom marginalen till brott är väldigt liten när man har gått över materialets sträckgräns. (Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 314-315)

För att kunna utnyttja hållfasthetsegenskaperna hos höghållfasta stål till fullo är det viktigt att man är bekant med de grundläggande dimensioneringsprinciperna som gäller. Elasticitetsmodulen är i det stora hela samma för alla stållegeringar d.v.s. ca 206 GPa. Om en konstruktion som är lastbärande konstrueras för styvhet, d.v.s. med avseende på elastisk deformation kan man inte utnyttja egenskaperna hos höghållfasta stål fullständigt. Även instabilitetsfenomenen buckling och knäckning är beroende av elasticitetsmodulen och inte av stålets hållfasthet. Det gäller också att känna till att den värmepåverkade zonens hållfasthet mot utmattning nära en svets inte beror på grundmaterialets hållfasthet. I detta fall gäller det alltså att placera svetsar i områden med låga belastningar. Elasticitetsmodulen avtar med ökande temperatur. För stållegeringar avtar den med 2-5% per 100 K ökning av temperaturen. Elasticitetsmodulen påverkas kraftigare av temperaturökningar hos material med låg smältpunkt. Vanliga kolstål kan användas upp till en temperatur på ca 350°C (Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 315-316)

2.2.2 Aluminium

Efter stål är aluminium det mest använda metalliska konstruktionsmaterialet. Speciellt inom rymd och flygindustrin är aluminiumlegeringar de överlägset mest använda. (Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 317) Aluminium är det tredje mest förekommande grundmaterialet på jorden (8 %) efter syre (49,5%) och kisel (25,7%). Aluminium reagerar dock väldigt lätt med syre och andra grundämnen och därför förekommer det inte som rent grundmaterial i jordskorpan utan istället hittas det som olika oxider och silikater. Vanligen framställs aluminium ur råmaterialet bauxit (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2).

Framställningen kan delas upp i två steg:

- Framställning av aluminiumoxid från bauxit
- Framställning av rent aluminium från aluminiumoxid med hjälp av elektrolys

För att framställa 1kg rent aluminium behövs ca 2kg aluminiumoxid som i sin tur kräver ca 4kg bauxit. Aluminiumframställning är väldigt energikrävande. För att tillverka 1kg rent aluminium från bauxit går det åt ca 45MJ värmeenergi (bauxit -> aluminiumoxid) och 47MJ elenergi (aluminiumoxid -> aluminium). (Lukkari, 2001, s. 8)

De viktigaste egenskaperna för aluminium kan listas som följande:

- Densiteten är låg (ca 2700kg/m³) samtidigt som hållfastheten är god. Detta innebär att aluminium lämpar sig för konstruktioner där vikten är av stor betydelse exempelvis inom flygindustrin.
- Elasticitetsmodulen är låg (ca 1/3 av stål) vilket gör att för en given belastning blir nedböjningen/deflektionen 3 gånger större än för stål. Den låga elasticitetsmodulen leder också till att aluminium är betydligt bättre på att uppta slagbelastning eftersom absorptionsförmågan är bättre.
- Korrosions- och väderbeständigheten är god. Detta beror på aluminiums förmåga att bilda ett skyddande oxidskikt på materialets yta. På grund av denna egenskap lämpar sig aluminium mycket bra som konstruktionsmaterial för livsmedels-, kemiska- och transportindustrin.
- Elektriska ledningsförmågan är god, ca 60 % av den för koppar men sex gånger högre än för stål. Detta gör att aluminium lämpar sig för elektriska komponenter.
- Värmeledningsförmågan är hög. Aluminium lämpar sig därför för komponenter som exempelvis kolvar, cylindrar och andra komponenter som kräver bra värmebortföring.

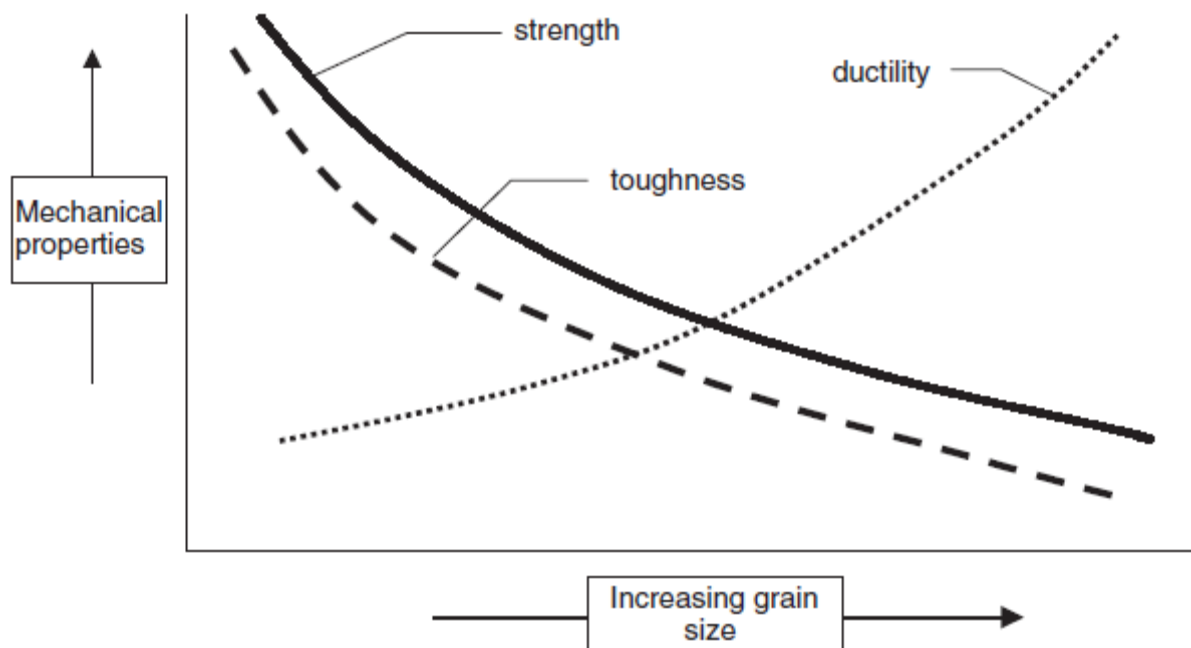
- Hållfasthetsegenskaper som till exempel slagseghet bibehålls eller förbättras vid låga temperaturer. Detta beror på att aluminium har en ytcentrerad kubisk kristallstruktur. I jämförelse med stål så blir aluminium inte sprött vid lägre temperaturer. Därför lämpar sig aluminium vid "lågtemperaturkonstruktioner" exempelvis LNG-tankar (-163°C).
- Formbarheten är god. Den låga smälttemperaturen i kombination med kristallstrukturen möjliggör produktion av komplicerade profiler med hjälp av extrudering och djuppressning.
- Kristallstrukturen hos aluminium ändras inte beroende på uppvärmning och nedkylning, i jämförelse med stål som genomgår fasförändringar.
(Lukkari, 2001, s. 24; Mathers, 2002, s. 5)

Ren aluminium används sällan som sådan i konstruktionssammanhang eftersom det är en relativt mjuk metall med en sträckgräns på ca 60MPa. För att uppnå önskade egenskaper på aluminium legeras det vanligen med metaller som koppar, mangan, kisel, magnesium och zink. Ibland kan även titan, zirkonium och bly tillsättas i små mängder. Huvudsakliga syftet med legeringarna är att höja på hållfastheten men de kan också tillsättas för att förbättra exempelvis korrosionsbeständighet och svetsbarhet. (Lukkari, 2001, s. 10-11; Mathers, 2002, s. 5)

De olika legeringsämnena har följande inverkan:

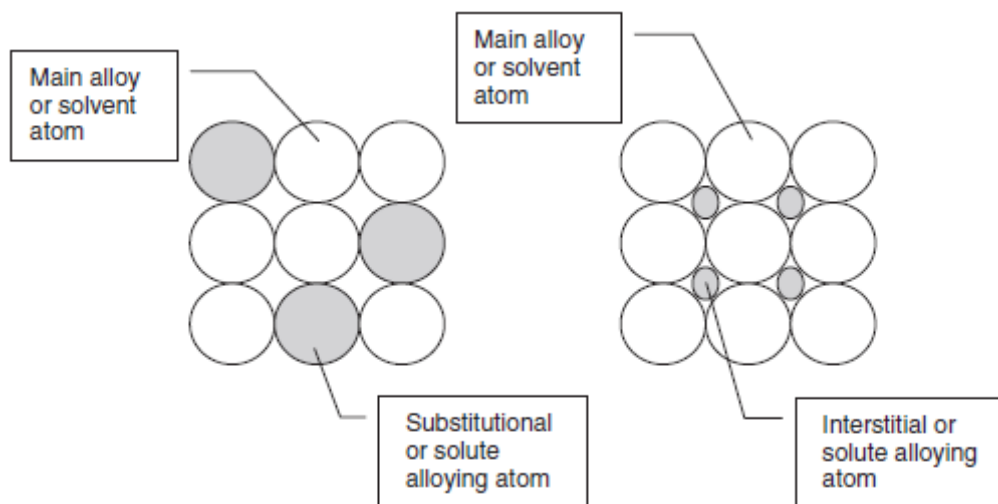
- Koppar förbättrar hållfastheten
- Kisel ökar styrkan samt förbättrar flytbarheten
- Mangan förbättrar hållfastheten utan att försämra materialets seghet
- Magnesium ökar hållfastheten utan att försämra korrosionsbeständigheten
- Zink i kombination med magnesium och koppar ger väldigt hög hållfasthet
- Titan och zirkonium kan tillsättas för att kontrollera/minska kornstorleken. Detta används framförallt för att minska risken för varmsprickor i aluminium.
(Lukkari, 2001, s. 11; Mathers, 2002, s. 12-13)

För att förbättra hållfastheten hos aluminiumlegeringar finns ett antal olika metoder, bland annat kontroll av kornstorlek, lösningshårdning, kallbearbetning och utskiljningshårdning (age hardening). I normala fall används kontroll av kornstorlek inte till att förbättra hållfastheten hos aluminium utan för att minska risken för varmsprickor. Kornstorleken har dock en direkt inverkan på sträckgränsen enligt: $\sigma_s = \sigma_1 + k_y d^{-1/2}$, där d är medeldiametern på kornen och σ_1 samt k_y är materialkonstanter. (Mathers, 2002, s. 12-13)



Figur 1. Mekaniska egenskaper som funktion av kornstorlek. (Mathers, 2002, s. 13)

Lösningshårdning innebär att atomer av ett legeringsämne förs in i materialgittret och orsakar en spänning i detta. Spänningen i materialgittret ökar på materialets sträckgräns genom att förhindra rörelsen av atomerna i gittret. Däremot blir formbarheten lidande. Lösningshårdning utförs så att legeringsämnena löses upp i ursprungsmaterialet som är i flytande form. När legeringen kallnar stelnar den som en solid lösning. Det finns två typer av lösningshårdning. Den ena är så kallad interstitiell lösningshårdning vilket innebär att legeringsämnets atomer förs in i mellanrummen mellan atomerna i ursprungsmaterialets gitter. Den andra typen kallas substitutionell lösningshårdning vilket innebär att legeringsämnets atomer ersätter ursprungsämnets atomer i materialets gitter. Detta förutsätter dock att storleken på legeringsämnets atomer är inom $\pm 15\%$ av ursprungsmaterialets atomstorlek. (Mathers, 2002, s. 13-14)



Figur 2. Substitutionell och interstitiell lösningshärdning. (Mathers, 2002, s. 14)

Kallbearbetning (deformationshärdning, kalldeformation) är en process för att öka på styrka och/eller hårdhet hos material som inte kan värmebehandlas. Kallbearbetning innebär formförändring med hjälp av mekanisk energi. Formförändringen innebär att materialet blir starkare och hårdare på grund av spänningarna som uppstår i kornen i materialet. Det innebär också att formbarheten blir lidande. Om materialet kallbearbetas tillräckligt mycket uppnås en punkt där materialet har blivit så hårt och skört att mera bearbetning inte är möjligt utan att sprickor uppstår. Vid kallbearbetning förlängs materialets korn i bearbetningsriktningen vilket ger en hög intern spänning i kornen. Denna spänning ökar inte bara materialets styrka utan ger också en mycket liten minskning av densiteten, en liten ökning av värmeutvidgningskoefficienten samt en liten minskning av korrosionsbeständigheten. Om ett kallbearbetat material värms upp börjar de interna kornspänningarna avta och materialet börjar återhämta sig. Denna uppvärmningsprocess kan återställa de flesta av materialets fysiska egenskaper utan att kornstrukturen eller de mekaniska egenskaperna förändras. (Mathers, 2002, s. 15-16)

Utskiljningshärdning fungerar på principen att legeringen värms upp så att legeringsämnena blir lösliga. Ursprungsmaterialet kan lösa upp mera legeringsämnen när det är uppvärmt jämfört med när det är kallt. När materialet sedan kyls ned snabbt (exempelvis med vatten) blir det övermättat. Hur snabbt materialet behöver kylas beror på legering. Det är dock viktigt att kylningen sker så snabbt att legeringsämnena inte hinner fällas ut. Efter detta värms materialet till en mycket lägre temperatur över en längre tid. När temperaturen stiger börjar extremt små partiklar utfällas i materialets kornstruktur. Detta orsakar precis som i lösningshärdning spänningar i materialets gitter som i sin tur ökar hållfastheten. Med denna metod kan väldigt höga sträckgränser uppnås för aluminium. (Mathers, 2002, s. 16-17)

Beteckningssystem för olika aluminiumlegeringar följer SFS-EN 573. Standarden för benämning av de olika legeringarna är identisk med den amerikanska versionen från Aluminum Association. Beteckningarna är fyrsiffriga och berättar vilken typ av legering det handlar om.

Exempel: AW-5083

Den första bokstaven, A, innebär att det är aluminium det handlar om.

Den andra bokstaven berättar vilken typ av material det är frågan om. I detta fall smidesmaterial, W (från engelskans wrought). Kan även vara exempelvis gjutmaterial, C (cast).

Den första siffran berättar om vilket som är det huvudsakliga legeringsämnet. (5=magnesium)

De tre sista siffrorna berättar om vilken specifik legering det gäller. (Obs! Detta gäller inte för rent aluminium, 1xxx, där de sista siffrorna berättar hur rent materialet är i procent)

Följande nummerserier används för olika aluminiumlegeringar:

- 1XXX – rent aluminium (minst 99,00%).
- 2XXX – aluminium-kopparlegeringar.
- 3XXX – aluminium-manganlegeringar.
- 4XXX – aluminium-kisellegeringar.
- 5XXX – aluminium-magnesiumlegeringar.
- 6XXX – aluminium-magnesium-kisellegeringar.
- 7XXX – aluminium-zink-magnesiumlegeringar.
- 8XXX – övriga legeringsämnen ex. litium, järn.

(Lukkari, 2001, s. 40-41; Mathers, 2002, s. 36-38)

Aluminiumlegeringars mekaniska egenskaper beror inte enbart på legeringsämnena som har använts utan också på hur de har blivit tillverkade. Det vill säga om materialet har blivit mjukglödgat, värmebehandlat, kallbearbetat etc. Nedan följer en lista på de olika tillverkningstillstånden som olika aluminiumlegeringar kan ha:

- F – Fabrikstillstånd. Inga mekaniska egenskaper är angivna för detta tillstånd
 - O – Mjukglödgat Lägsta hållfastheten för en given legering
 - H – Kallbearbetat. H följs alltid av minst två siffror som berättar om hur mycket materialet har blivit bearbetat samt om materialet har blivit värmebehandlat. Den första siffran anger om materialet endast blivit kallbearbetat (1), kallbearbetat och delvis glödgat (2), kallbearbetat och stabiliserat (3), kallbearbetat och målat (4). Den andra siffran anger hårdheten (2-8). Exempelvis H14 – kallbearbetat och med en styrka som ligger mellan O och H18, dvs. mellan mjukglödgat och full hårdhet.
 - W – Lösningshärdat. Detta tillstånd tillämpas på legeringar som har utskiljningshärdats i rumstemperatur (kallåldring).
 - T – Värmebehandlat. Legeringar som värmebehandlats och åldringshärdats för att producera en stabil legering. Följs alltid av en siffra som anger vilken typ av värmebehandling som har använts. Exempel: T1 – kylt från varmbearbetning och kallåldrat, T4 – lösningshärdat och kallåldrat, T6- lösningshärdat och varmåldrat.
- (Lukkari, 2001, s. 44-45; Mathers, 2002, s. 36-38)

2.3 Tillverkningsmetoder

2.3.1 Svetsning

Svetsning är en process i vilken man använder hög temperatur för att skapa bestående förband i metalliska material. Både materialet i fogen på det som skall svetsas samt eventuellt tillsatsmaterial smälts ihop. De svetsade delarna smälts ihop och skapar en enhet. Hållfastheten i det svetsade området är oftast bra men svetsningens höga temperatur kan leda till att ett stort område av materialet blir utsatt för värmepåverkan. Sprickor, porer och slagginneslutningar är svetsfel som kan leda till minskad hållbarhet, speciellt när det gäller utmattning.

De överlägset mest använda svetsmetoderna är elektriska (bågsvetsning). Vanligaste bågsvetsningsmetoderna är SMAW (Shielded Metal Arc Welding), MIG (Metal Inert Gas) och TIG (Tungsten Inert Gas). Bågsvetsning går ut på att man har en strömkälla som levererar en strömstyrka på upp till 4000A vid 20-50V. Den höga strömmen skapar en ljusbåge mellan svetsens elektroder. För att skydda ljusbågen från atmosfärens skadliga verkan används antingen skyddsgas eller belagda elektroder. (Johannesson, Persson, Pettersson, 2004, s. 551)

2.3.2 TIG – Svetsning

TIG-svetsning är en metod för smältsvetsning som fått sitt namn från engelskans Tungsten Inert Gas. Tungsten är det engelska namnet på elektrodens material d.v.s. volfram. Svetsmetoden använder sig av en inert skyddsgas vilket innebär att denna inte deltar i själva processen för svetsandet utan endast skyddar smältan och elektroden från atmosfärens skadliga inverkan. Gasen har dock en inverkan på hur atmosfären i ljusbågen joniseras. TIG-svetsning kan också nämnas GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) eller WIG (Wolfram Inert Gas). (TIG-svetsning, s. 3)

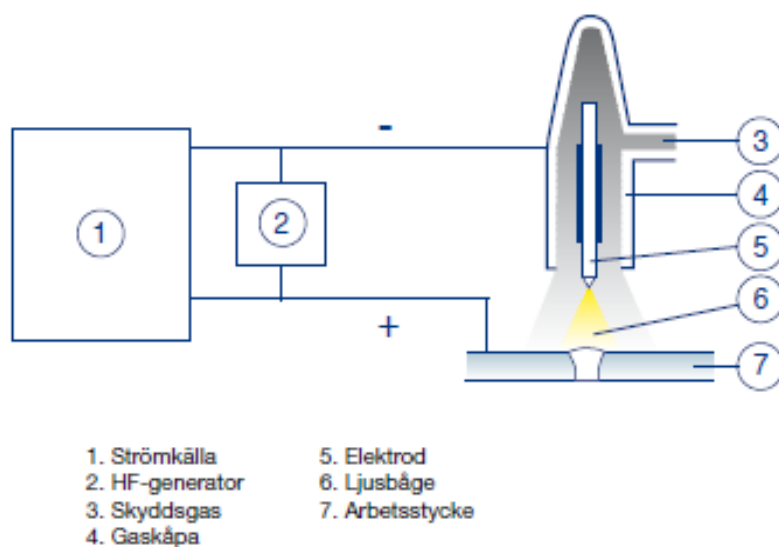
TIG-svetsning kännetecknas av:

- Hög svetskvalitet
- Möjlighet att svetsa tunna material
- Allsidig metod (passar för många olika material)
- Jämn och fin svets
- Inget sprut
- Fina toleranser
- Stabil och koncentrerad ljusbåge
- Relativt långsam metod (speciellt vid större materialtjocklek)
- Ingen svetsrök
- Ingen slaggbildning
- Värmetillförsel är oberoende av tillsatsmaterial

(TIG-svetsning, s. 3)

När man TIG-svetsar uppstår en ljusbåge mellan svetselektroden och arbetsstycket. För att skydda elektroden, smältan och ljusbågen mot syre, kväve och fuktighet som finns i luften används en inert skyddsgas. Skyddsgasen som används beror på vilket material som svetsas men i allmänhet används argon. I normala fall används likström med elektroden kopplad till minuspolen. Detta beror på att värmefördelningen gör att ca 70 % av värmen utvecklas i pluspolen. Vid stora materialtjocklekar och höga strömmar kan detta leda till att elektroden smälter. Elektroden kopplad till minuspolen ger däremot inte nöjaktig uppbrytning av oxidskiktet hos lättmetaller. Vid svetsning av aluminium och andra lättmetaller används därför oftast växelström. När man använder växelström är man ute efter den oxiduppbrytande effekten man får när elektronerna går från arbetsstycket till elektroden. (TIG-svetsning, s. 5)

TIG-svetsning kan göras så att man bara smälter samman svetsgodset men det är vanligare att man använder tillsatsmaterial. Med tillsatsmaterial kan man även få in legeringsmaterial i svetsen. Tillsatsmaterial vid TIG-svetsning tillförs som separata trådar och är inte strömförande (jämför med MIG-svetsning). Därför går det alltså att kontrollera förhållandet mellan värme och tillsatsmaterial. (TIG-svetsning, s. 5)



Figur 3. TIG-svetsningens principer (TIG-svetsning, s. 7)

Fördelarna med att använda sig av TIG-metoden i jämförelse med andra svetsmetoder är bland annat den utmärkta kvaliteten på svetsen. TIG-svetsning kan användas både för manuell och mekaniserad svetsning. En annan fördel är också möjligheten att svetsa många olika typer av material. TIG-metoden används framförallt när det gäller svetsning av rostfria och andra höglegerade stål och därtill även för svetsning av icke järnmetaller exempelvis olika aluminium- och kopparlegeringar. När man använder sig av TIG-svetsning har man också väldigt bra kontroll på värmetillförseln till svetsgodset. Detta innebär att man kan svetsa detaljer som inte skulle gå att svetsa med andra metoder, exempelvis med SMAW- eller MIG-svetsning. Svetsarna blir också oftast mycket jämna och rent visuellt tilltalande vilket i många fall kan vara avgörande. (TIG-svetsning, s. 7)

TIG-svetsning kan efter god beredning av svetsfogar användas på i princip alla materialtjocklekar men metoden lämpar sig ändå bäst på tjocklekar mellan 0,3-4mm. I jämförelse med andra bågsvetsningsmetoder är TIG-metoden relativt långsam, i synnerhet när det kommer till större materialtjocklekar. Detta beror på att metoden använder sig av lägre ström och spänning vilket i sin tur leder till att effekttätheten minskar. TIG-svetsning kan dock kombineras med andra svetsmetoder för att uppnå en nöjaktig svetshastighet. Exempelvis rotsträngen i en svetsfog kan svetsas med TIG-metoden medan fyllnadssträngarna svetsas med SMAW eller MIG. Detta ger en god svetsning av roten och svetshastigheten hålls på en högre nivå. (TIG-svetsning, s. 7-8)

Materialtyper som lämpar sig för TIG-svetsning:

- Rostfritt/Syrafast stål
- Aluminiumlegeringar
- Titan
- Inconel
- Monel
- Duplex
- Kopparlegeringar
- Ovanliga svetsmetaller, exempelvis beryllium
- Låg legerat kolstål

(TIG-svetsning, s. 7)

2.3.3 Aluminiumsvetsning

De överlägset mest använda metoderna för svetsning av aluminium är TIG- och MIG-metoderna. TIG-metoden har flera fördelar, bland annat när det kommer till små materialtjocklekar, om man bara kan svetsa från en sida (d.v.s. om rotsidan av svetsen är onåbar) eller om man är ute efter en fin finish på svetsen. Aluminium svetsas normalt med växelström. Med växelström får man bra uppbrytning av det skyddande oxidlagret som annars har mycket högre smältpunkt än själva svetsgodset. Aluminiumoxiden kan också orsaka svetsfel ifall den kommer med i svetssmältan. (TIG-svetsning, s. 31)

I jämförelse med stål har aluminium många egenskaper som påverkar svetsningen på ett väldigt påtagligt sätt. Egenskaper som har störst inverkan på svetsning av aluminium i jämförelse med stål kan listas enligt följande.

- Alla järnoxider har smältpunkter nära eller under smältpunkten för stållegeringar. Aluminiumoxid smälter vid 2060°C, dvs. ungefär 1400°C högre än smältpunkten för aluminium. Detta har stor inverkan på svetsprocessen eftersom det blir nödvändigt att få bort oxidskiktet för att uppnå god svetskvalitet
- Aluminium har en dubbelt högre värmeutvidgningskoefficient än stål. Detta kan leda till kraftig förvrängning och buckling.
- Värmeledningsförmågan är sex gånger högre än för stål. För att kunna svetsa behövs alltså en mycket kraftigare och mera koncentrerad "värmekälla". Denna egenskap blir i synnerhet märkbar vid större materialtjocklekar där svetsdefekter kan uppstå ifall värmen leds bort för snabbt.
- Den specifika värmekapaciteten för aluminium, dvs. den energi det går åt för att värma materialet till en viss temperatur, är dubbelt högre än den för stål.

- Aluminium ändrar inte färg när det blir upphettat. Detta kan göra det svårt för svetsaren att avgöra när materialet håller på att smälta.
- Aluminium är icke-magnetiskt vilket eliminerar blåsverkan på ljusbågen. D.v.s. ljusbågen ”vandrar” inte på grund av magnetfält som uppstår i materialet kring svetsen. (Mathers, 2002, s. 4-5)

En ideal svets, dvs. den svetsade detaljen, tillsatsmaterialet och den värmepåverkade zonen (HAZ – heat affected zone) skulle ha samma materialegenskaper som ursprungsmaterialet. När man svetsar i aluminium finns det dessvärre många egenskaper och defekter som kan bidra till att materialegenskaper tappas eller försämrats. Exempelvis gasporositet, oxidinneslutningar, värmesprickor, minskad hållfasthet i svetsen och den värmepåverkade zonen, bindfel etc. (Mathers, 2002, s. 10)

Porositet är ett problem som uppstår i själva svetsen. Problemet uppkommer av att gas som löses upp i svetsmältan blir instängd när smältan stelnar. På så vis uppstår ”bubblor”/porer i svetsen. Porositet kan vara allt från extremt små mikro-porer till 3-4mm stora porer. Vanligaste orsaken till porositet vid aluminiumsvetsning är vätgas, som har hög löslighet i smält aluminium men väldigt låg löslighet i stelnat (ca 20 gånger mindre). Denna kraftiga skillnad på löslighet gör det väldigt svårt att producera en svets fri från porer i aluminium. Största vätgaskällan när det kommer till svetsning av aluminium är tillsatsmaterialet. Porositeten brukar oftast därför vara lägst i svetsar där man inte har tillsatt något material. En annan källa till vätgas är fuktigheten som kommer in i svetsen via skyddsgasen och/eller tillsatsmaterialet. Fukten reagerar med ljusbågen och bildar vätgas. För att minska problemet med porositet är det viktigt att både ursprungsmaterialet samt tillsatsmaterialet är rent. En noggrann avfettning följt av mekanisk rengöring med hjälp av en rostfri stålborste är nödvändig. (Mathers, 2002, s. 18-22)

För att undvika problem som porositet är det viktigt att få bort oxidskiktet före man svetsar. Det är också nödvändigt att hålla bort skiktet medan man svetsar för att undvika problem såsom bindfel och oxidinneslutningar. Aluminiumoxid är en väldigt ihärdig och snabbbildande oxid som ger aluminium dess goda korrosionsbeständighet. Oxiden har en väldigt hög smältpunkt, ca 2060°C jämfört med rent aluminium som

smälter vid 660°C. För att få ett bra svetsresultat måste oxidskiktet avlägsnas. Detta kan åstadkommas med att man ansluter svetselektroden till strömkällans positiva pol. När elektroner åker från materialet till elektroden ”bombaderas” materialet med joner som åker i motsatt riktning. Detta leder i sin tur till att oxidskiktet löses upp och avlägsnas.

Vid TIG-svetsning kan dock elektroden överbelastas om den är kopplad till positiva sidan på grund av att 60-70% av värmen bildas vid den positiva polen. För att komma runt detta problem kan man använda sig av växelström. Vid användning av växelström är den positiva halvperioden den som bryter upp oxidskiktet och den negativa halvperioden kyler ned elektroden. (Mathers, 2002, s. 22-24)

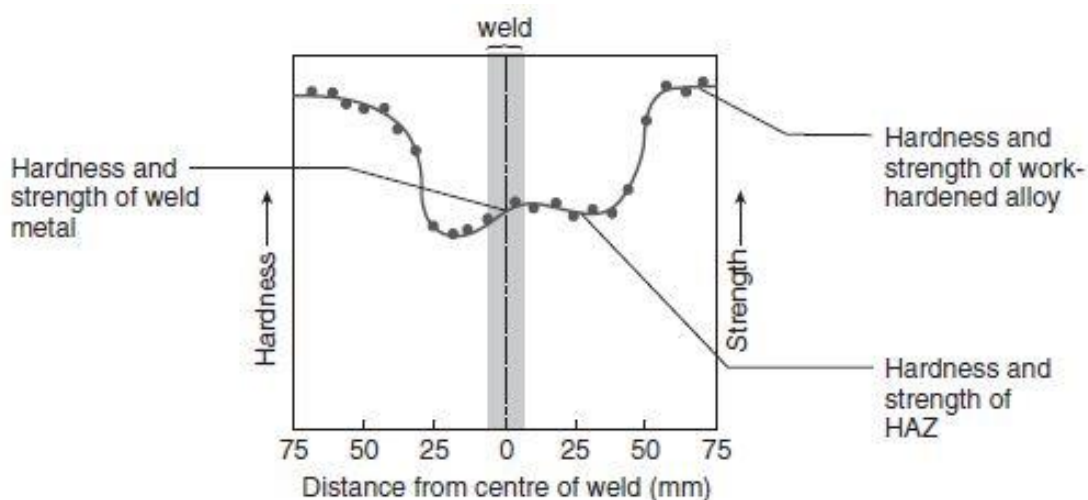
För att vid smältsvetsning kunna åstadkomma en svets, måste komponenterna som skall sammanfogas värmas upp till smältpunkten och sammanföras. Värmen som uppstår vid svetsning leds ut i den svetsade detaljen och bildar tre distinkta områden: svetsfogen med tillsatsmaterial, den värmepåverkade zonen hos ursprungsmaterialet samt ursprungsmaterialet som inte blivit påverkat. Den värmepåverkade zonen kan ytterligare delas upp i områden med olika egenskaper beroende på vilka legeringar som använts. På grund av att den värmepåverkade zonen har utsatts för en eller flera serier av uppvärmning och nedkylning under svetsningens gång kan dess materialegenskaper vara väldigt olika jämfört med ursprungsmaterialet. Detta gäller speciellt aluminiumlegeringar som har blivit kallbearbetade eller utskiljningshårdade. Bredden på den värmepåverkade zonen är en funktion av aluminiumlegeringars höga värmeledningsförmåga och därför också storleken på det område där materialets hållfasthet har minskat. Endast hos legeringar som är mjukglödgade eller i fabrikstillstånd är materialegenskaperna i den värmepåverkade zonen samma som hos ursprungsmaterialet. (Mathers, 2002, s. 31)

Vid smältsvetsning blir svetsfogen en så kallad ”as-cast”(se fabrikstillstånd) struktur bestående av tillsatsmaterialet och ursprungsmaterialet på detaljen som svetsas. Svetsens egenskaper beror på sammansättningen av materialen, kvaliteten samt kornstorleken hos svetsfogens material. Dessa beror i sin tur på sammansättningen, ursprungs- och tillsatsmaterialet, svetsprocessens kvalitet, svetsaren samt hur snabbt svetsen stelnar. De flesta tillsatsmaterial kan inte åldringshårdas (med undantag för några ur 2XXX serien) men på grund av uppblandningen med ursprungsmaterial kan

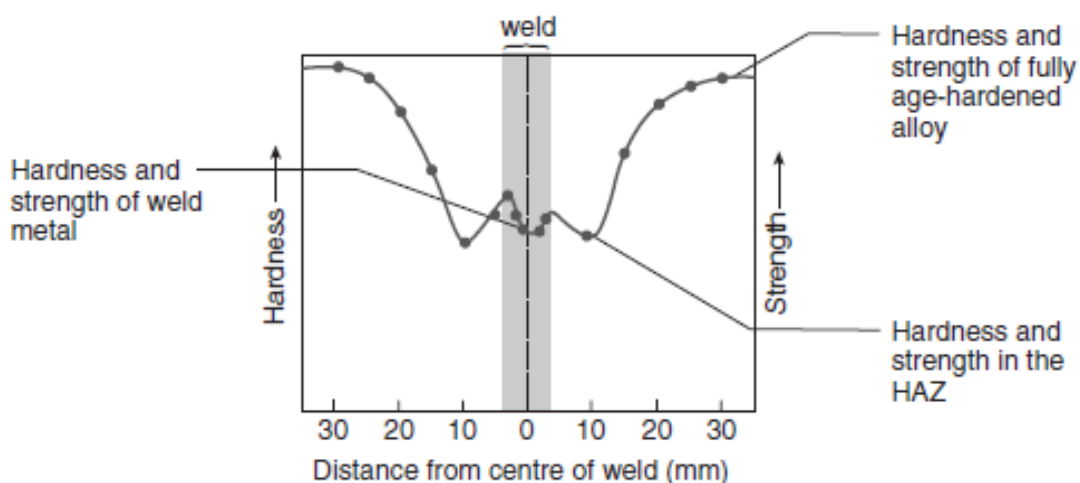
en viss åldringshärdning äga rum. En snabb stelningshastighet ger finare kornstruktur än en långsam stelningshastighet och därför också bättre mekaniska egenskaper. En liten svetssträng har därför i allmänhet bättre egenskaper och större motstånd mot varmsprickning än en stor svetssträng. (Mathers, 2002, s. 31-32)

Det finns väldigt lite man kan göra för att förbättra egenskaperna för svetsens material. Lösningshärdning kan hjälpa till viss del och val av korrekt tillsatsmaterial kan höja svetsens hållfasthet avsevärt. I allmänhet gäller att svetsens material endast kan motsvara ursprungsmaterialets egenskaper om ursprungsmaterialet är mjukglödgat eller i fabrikstillstånd. I material där man har använt sig av kallbearbetning för att förbättra egenskaperna är det inte praktiskt lönsamt/möjligt att försöka uppnå dessa genom att kallbearbeta svetsen. Svetsens lägre hållfasthet måste därför accepteras och tas i beaktande vid konstruktion. En åldringshärdning kan öka en svets hållfasthet i vissa fall om ursprungsmaterialet är hårdbart genom utskiljningshärdning samt om tillsatsmaterialet innehåller de rätta legeringarna. Hur pass stor inverkan härdningen får beror på tillsatsmaterialets sammansättning samt på uppblandningen av ursprungs- och tillsatsmaterialet. (Mathers, 2002, s. 32)

Vid svetsning av material som är antingen mjukglödgade eller i fabrikstillstånd fås ingen betydande minskning av materialets hållfasthet i den värmepåverkade zonen. Svetsens hållfasthet blir i princip samma som ursprungsmaterialets. Hos legeringar som har kallbearbetats eller utskiljningshärdat kan dock en betydande förminskning av hållfastheten ske i den värmepåverkade zonen. De kallbearbetade legeringarna tappar sin hållfasthet på grund av rekristalliseringen som sker i den värmepåverkade zonen när temperaturen stiger över 200°C. Rekristalliseringen ökar med stigande temperatur och redan vid 300°C sker glödning av materialet. Detta leder först till en drastisk minskning av materialets sträck- och brottgräns. Liknande förlopp, om än mera komplexa, kan ses hos värmebehandlade legeringar. Också hos dessa är minskningen av materialets sträck- och brottgräns kraftig i den värmepåverkade zonen. (Mathers, 2002, s. 32-34)



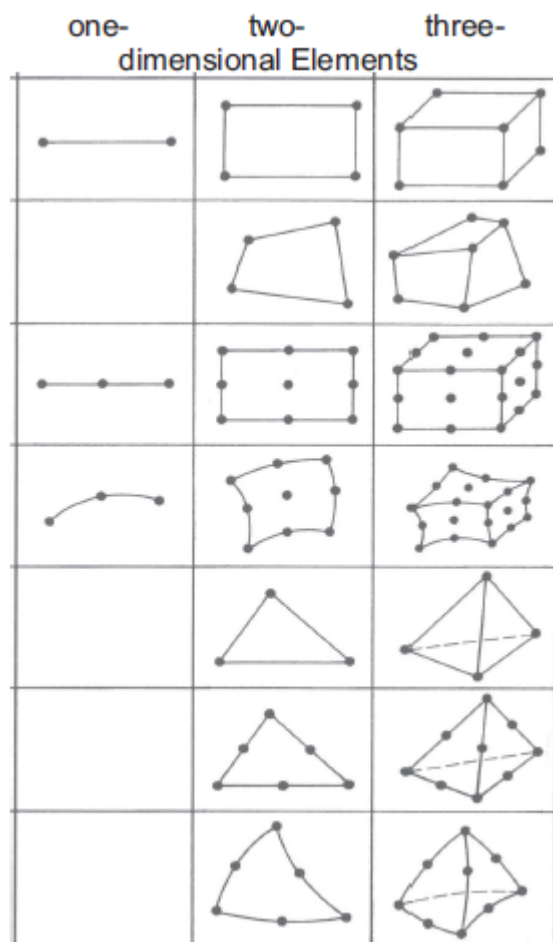
Figur 4. Svetspåverkan på kallbearbetad aluminiumlegering. (Mathers, 2002, s. 33)



Figur 5. Svetspåverkan på AW 6061 T6 åldringshärdad legering. (Mathers, 2002, s. 34)

2.4 Finita element metoden

Den finita element metoden (FEM) är en metod med vilken man kan beräkna spänningar, deformationer, egenfrekvenser och strukturers dynamiska beteenden. Analys med hjälp av FEM har blivit allt vanligare de senaste åren och är numera en industri som omsätter många miljarder euro årligen. Numeriska lösningar till komplicerade mekaniska problem kan nu fås väldigt enkelt genom användningen av FEM. Namnet kommer från metodens arbetssätt, dvs. att man delar in strukturen i ett begränsat antal mindre strukturer s.k. element. Denna indelning kallas för diskretisering. Tillsammans bildar dessa element ett nätverk (mesh). Punkterna där de finita elementen är ihopkopplade kallas för noder. (Heinze, Schmidt, 2013, s. 3-4)



Figur 6. Olika typer av element. (Heinze, Schmidt, 2013, s. 5)

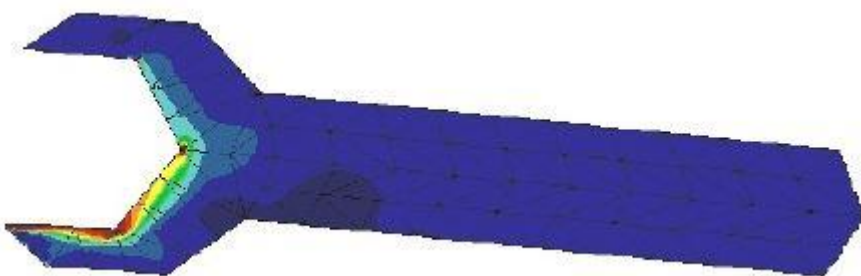
Ur figur 6 kan de vanligaste typerna av element ses. Noderna finns i elementens hörn och kan också finnas i elementens mittpunkter beroende på elementtyp. Om man antar att en linjär elastisk analys utförs, beräknas deformationen vid elementens noder enligt hur strukturen har belastats och låsts fast. På detta sätt behöver man alltså bara räkna deformationen vid ett begränsat antal punkter (noder) istället för att vara tvungen att räkna deformationen vid alla punkter inom strukturen. Om man utgår från en två-dimensionell struktur, består deformationen i varje nod av två komponenter, x och y . Dessa komponenter kallas frihetsgrader. I en tre-dimensionell struktur har varje nod tre frihetsgrader. Det totala antalet frihetsgrader bestäms alltså enligt antalet frihetsgrader per nod. Efter att deformationen har beräknats räknas motsvarande sträckning ut och utgående från denna sträckning kan spänningarna i strukturen beräknas. (Introduction to Finite Element Analysis, s. 2-3)

I allmänhet kan FE-analysen delas upp i tre olika steg:

1. Förbehandling – Detta innebär att strukturen modelleras upp så att den motsvarar den verkliga detaljen/strukturen som skall analyseras. Kvaliteten på analysens resultat beror till stor del på hur detta steg utförs. Strukturens mekaniska och fysiska egenskaper bör tas i beaktande, dvs. vilket material som väljs, hurdana element som används och storleken på dessa. Man bör även ta i beaktande olika geometriska förenklingar som kan ha inverkan på slutresultatet. I detta steg bestäms också strukturens belastningar och låsningar (constraints). Alla dessa faktorer inverkar på hur tillförlitligt det slutgiltiga resultatet blir.

2. Analys – När strukturen är färdigt förbehandlad kontrolleras inmatade värden och data för fel som kan leda till problem vid beräkning. Efter detta utförs analysen och resultatfiler produceras. Om strukturen ens är litet komplicerad innehåller dessa filer enorma mängder med data.

3. Efterbehandling – När strukturen har beräknats presenteras data från resultatfilerna i FE-programmets ”efterbehandlingsmodul”. I denna fås resultatet som olika grafiska presentationer eller tabeller. Exempelvis så kan värden på spänningar och deformation i en struktur representeras av olika färger. (Introduction to Finite Element Analysis, s. 3-4)



Figur 7. Grafisk presentation av spänningar i en struktur. (Introduction to Finite Element Analysis, s. 5)

3 Metod

I detta kapitel beskrivs hur plattformen har utformats och konstruerats. Modellering och simulering av plattformen och dess detaljer har utförts i Siemens NX 9.0.

3.1 Plattformmoduler

Från början av arbetet fastställdes att plattformen skulle byggas upp av mindre moduler. Detta för att man enkelt skall kunna justera plattformens längd beroende på installerad motor. På grund av generatorkablar, elskåp och befintliga plattformar vill man inte att arbetsplattformen skall vara onödigt lång. En annan fördel med små moduler är att de blir lättare att montera samt att de tar mindre lagerutrymme när de inte används. Modulerna byggs även med ett utskjut med vilket det går att justera modulernas bredd för att bättre kunna anpassa plattformen enligt motorns bredd

Modulernas dimensioner bestämdes utgående ifrån information om vilka typer av motorer som kommer att testas i motorcellen. Med motortypernas bredd och längd som grund valdes moduldimensionen till 1x1m med ett utskjut på 0,5m. Med justerbara plattformar på båda sidorna av motorn ger detta alltså en möjlighet att totalt justera bredden med en meter.

Egenvikten på modulerna får inte bli för hög eftersom detta skulle innebära att lyftpelarnas bärkapacitet skulle minska. Därför valdes aluminium som konstruktionsmaterial för modulerna. Modulernas och utskjutens lastbärande profiler är strängpressade U-profiler av EN AW-6082 som är en höghållfast aluminium-kisel-magnesium-mangan legering. Denna legering har en sträckgräns på ca 260MPa och lämpar sig mycket bra för konstruktioner av denna typ. Svetsbarheten och bearbetbarheten är också god. Plattjärnen för stöd samt ”sparkplåten” är av AW-6063 T6 material. Även denna legering har relativt hög sträckgräns, ca 165MPa, och goda svets- och bearbetningsegenskaper.

Belastningen på modulerna begränsades till 400kg per modul. Lasten antas i ett ”worst-case scenario” appliceras enbart på utskjutet vilket ger största möjliga böjmoment (Mb).

Böjmomentet kan räknas enligt

$$(1) F = m \cdot g \quad (\text{Valtanen 2010, s. 193})$$

$$(2) M_b = F \cdot l \quad (\text{Valtanen 2010, s. 409})$$

I detta fall:

$$M_b = (400 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2) \cdot 1,5 \text{ m} = 5886 \text{ Nm} \quad (\sim 6000 \text{ Nm})$$

Om säkerheten antas vara 2 och sträckgränsen för AW-6082 är ca 260 MPa kan man således räkna ut hur stort böjmotstånd (W_b) U-profilerna på modulen bör ha:

$$n = 2, \quad \sigma_s = 260$$

$$\sigma_{ns} = 260/2 = 130 \text{ MPa}$$

$$(3) W_b = M_b / \sigma_{ns} \quad (\text{Valtanen 2010, s. 461})$$

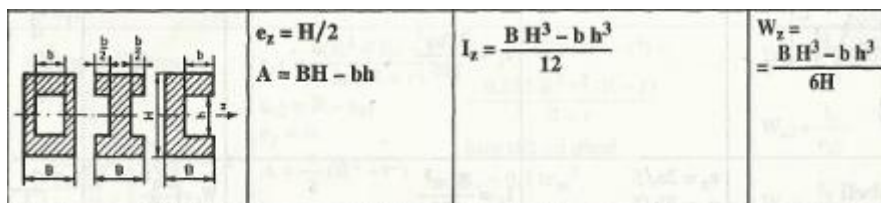
$$W_b = 6000000 \text{ Nmm} / 130 \text{ N/mm}^2 = 46153 \text{ mm}^3$$

Detta värde kan sedan divideras med två på grund av att man har två bärande profiler:

$$W_b = 46153 \text{ mm}^3 / 2 = 23076 \text{ mm}^3$$

Detta värde är riktgivande för hur stora profiler man är tvungen att välja. Man bör också ta i beaktande att aluminium blir svagare i svetsade områden vilket kan leda till att man måste välja en större profil. Av rent praktiska skäl valdes ramens U-profil till en med måttet 125*65 och utskjutets U-profil till 75*40. Dels på grund av att dessa fanns som standardmått och dels på grund av att utrymmet mellan dem är nödvändigt för att ha rum med gallerdurk och glidklossar på utskjutet. Glidklossarna är nödvändiga eftersom aluminium har en tendens att skära fast.

W_b -värdet på dessa kan räknas enligt figur:



Figur 8. Snittytors böjtröghetsmoment och böjmotstånd. (Valtanen 2010, s. 406)

$$W_b (U125*65) = 72900\text{mm}^3$$

$$W_b (U75*40) = 17971\text{mm}^3$$

Det låga värdet för utskjutets profiler kan tillåtas eftersom den fria längden bara är 0,5m samt att dessa profiler inte utsätts för någon svetsning som kan försämra hållfastheten.

I MIG-svetsade profiler av AW-6082 har man kunnat konstatera att sträckgränsen kan försämrats med så mycket som 50% i den värmepåverkade zonen. I ett worst case scenario fås alltså en sträckgräns på ca. 130MPa i det svetsade området. (SFS-EN 1999-1-1 2007, s.35) På grund av detta bör man ta i beaktande svetsarnas placering så att dessa inte överbelastas. Storleken på den värmepåverkade zonen beror på materialets tjocklek samt vilken svetsmetod som används. Värmezonen antas sträcka sig från svetsen ut i materialet i alla riktningar. Vid mig-svetsning kan följande värden för värmezonen användas:

$$0 < t \leq 6 \text{ mm: } b_{\text{haz}} = 20 \text{ mm}$$

$$6 < t \leq 12 \text{ mm: } b_{\text{haz}} = 30 \text{ mm}$$

$$12 < t \leq 25 \text{ mm: } b_{\text{haz}} = 35 \text{ mm}$$

$$t > 25 \text{ mm: } b_{\text{haz}} = 40 \text{ mm}$$

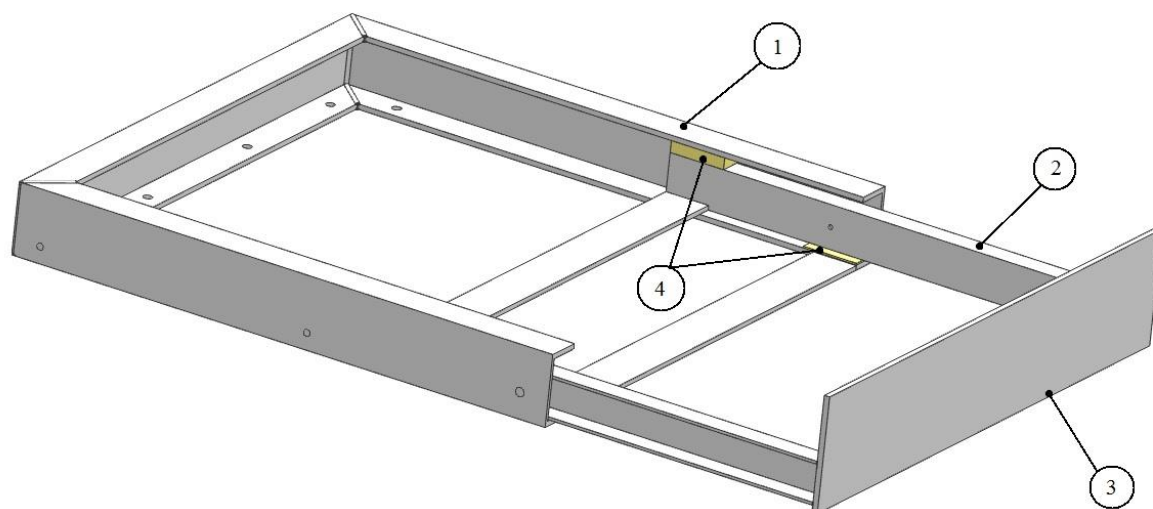
Vid TIG-svetsning är värmetillförseln större, därav gäller följande värden:

$$0 < t \leq 6 \text{ mm: } b_{\text{haz}} = 30 \text{ mm}$$

(t = materialtjocklek, b_{haz} = värmepåverkad zon)

(SFS-EN 1999-1-1 2007, s.61)

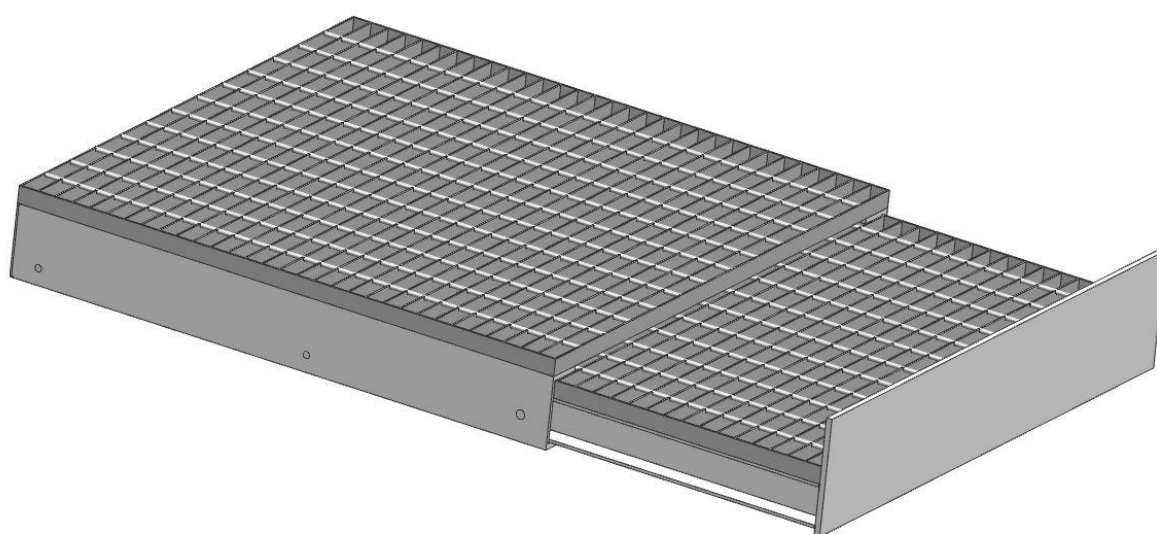
För att minska på belastningen på svetsarna placeras dessa diagonalt på profilerna. Detta leder till att en mindre area av svetsen belastas. Modulerna placeras också ovanpå och så långt bak som möjligt på den bärande balken för att minska på fria längden samt för att ge bättre stöd för modulen. Modulerna skruvas fast i den bärande balken med sex stycken skruvar för att jämna ut spänningarna så mycket som möjligt. I resultatdelen presenteras resultatet från den finita element analysen. Från analysen kan ses att de största modulbelastningarna kommer vid bärande balkens kant. Detta område är dock så långt från svetsfogen att det inte har blivit påverkat av den tillförda värmen vid svetsning. Spänningarna i området kring svetsen ligger kring 50MPa vid maximal belastning. Om den ursprungliga sträckgränsen antas ha minskat med hälften (260MPa -> 130MPa) ger detta en säkerhet på: $n = 2,6$ ($n = \sigma_s / \sigma_b$)



Figur 9. Plattformsmodul i aluminium

Lista på de olika delarna:

1. Modulram
2. Utskjut
3. Sparkplåt
4. Glidklossar



Figur 10. Plattformsmodul med gallerdurk

3.2 Bärande balk

Den bärande balkens uppgift är att fungera som infästningspunkt för modulerna samt att uppta deras last. Balken är fäst i lyftpelarna via två infästningspunkter som på samma gång höjer upp hela plattformen så att en högre maximal lyfthöjd kan uppnås. På grund av att denna balk skall uppta all last som kommer på plattformen skulle det inte vara lönsamt att tillverka den i aluminium. Därför bestämdes att denna balk skall vara av stål. Materialet som valdes är S355J2, dvs. konstruktionsstål med en sträckgräns på 355MPa.

Balkens längd bestäms utifrån antalet moduler som kommer att användas på plattformen. I detta fall fyra moduler, vilket leder till balkens längd: $4 \cdot 1\text{m} = 4\text{m}$. Balkens maximala fria längd är tre meter och detta kommer ifrån att lyftpelarnas infästning sker en halv meter från balkens ändar.

Balken dimensioneras enligt lyftpelarnas kapacitet som är 3000kg. Böjmomentet blir i ett "worst-case" scenario därför:

$$(1) F = m \cdot g \quad (\text{Valtanen 2010, s. 193})$$

$$(2) M_b = F \cdot l \quad (\text{Valtanen 2010, s. 409})$$

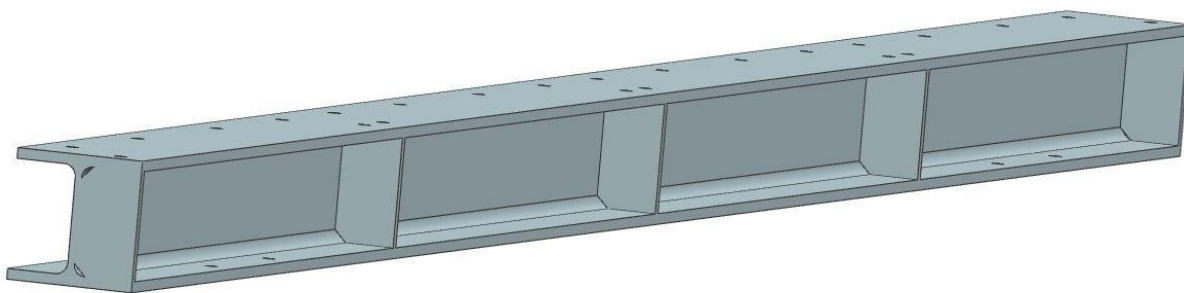
$$M_b = (3000\text{kg} \cdot 9,81\text{m/s}^2) \cdot 1,5\text{m} = 44145\text{Nm} \quad (\sim 45\text{kNm})$$

Balkens böjmotstånd bör således vara minst:

$$(3) W_b = M_b / \sigma_{ns} \quad (\text{Valtanen 2010, s. 461})$$

σ_{ns} : i detta fall 177,5MPa

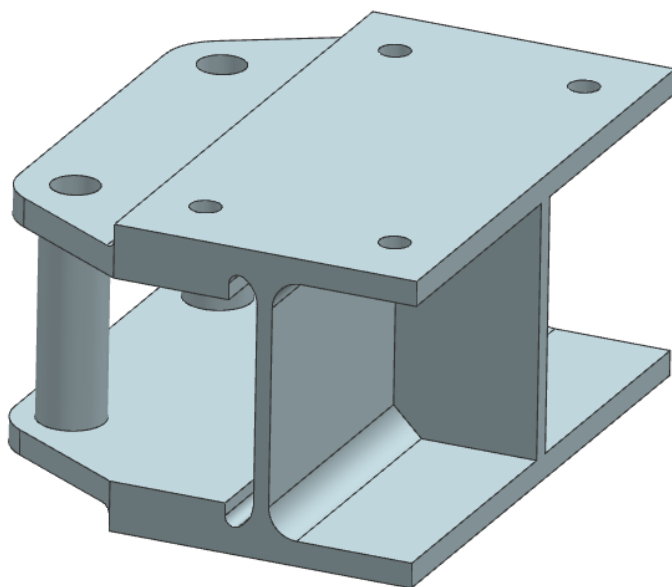
$$W_b = 45000000\text{Nmm} / 177.5\text{N/mm}^2 = 253521\text{mm}^3$$



Figur 11. Bärande balk med förstärkningar

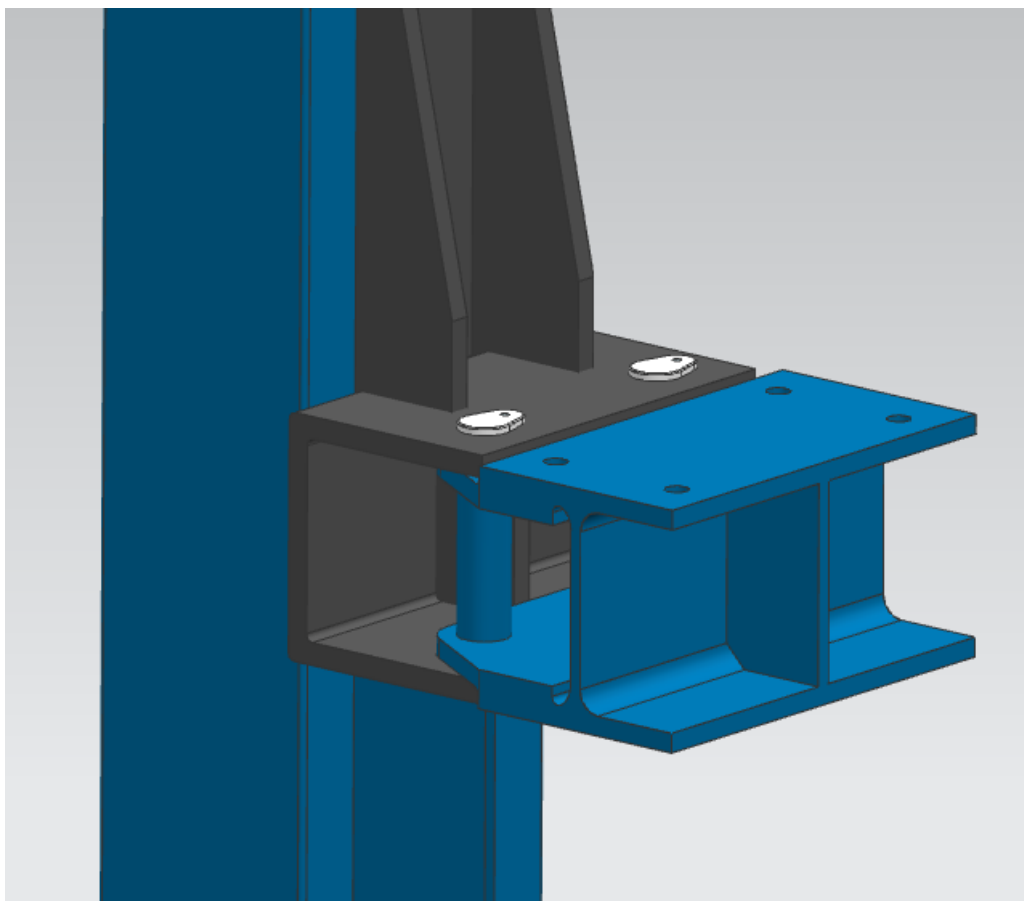
Utgående från det beräknade värdet på böjmotståndet valdes profilen på den bärande balken till HE 160B. För att ytterligare förstärka och styva upp balken läggs lodräta stödplåtar in under varje modulprofil samt vid infästningarna för lyftpelarna

3.3 Infästning



Figur 12. Balkinfästning

Balkinfästningen konstruerades så att plattformens bärande balk ligger fastskruvad ovanpå infästningen. På detta sätt ökar plattformens maximala lyfthöjd. Infästningen är konstruerad av samma HE 160B balk som den bärande balken. Därtill har två 15mm tjocka plåtar svetsats till för att kunna använda sig av lyftpelarens ursprungliga tappinfästning. Infästningen är också förstärkt med en lodrät plåt i balken där den största belastningen kommer.



Figur 13. Infästning monterad till lyftpelaren

4 Resultat

I detta kapitel presenteras den finita element analysen av de olika komponenterna. De största spänningarna i denna konstruktion kommer att uppstå i plattformsmodulernas infästning samt i lyftpelarnas infästning. För att undersöka var spänningskoncentrationerna uppstår samt för att se hur stora dessa blir utfördes en analys av komponenterna med hjälp av finita elementmetoden (FEM). FEM-analysen berättar också om komponenternas deformation när dessa belastas. Plattformen simulerades också som helhet för att få en riktigvisande visning av hur vridspänningar påverkar de bärande komponenterna.

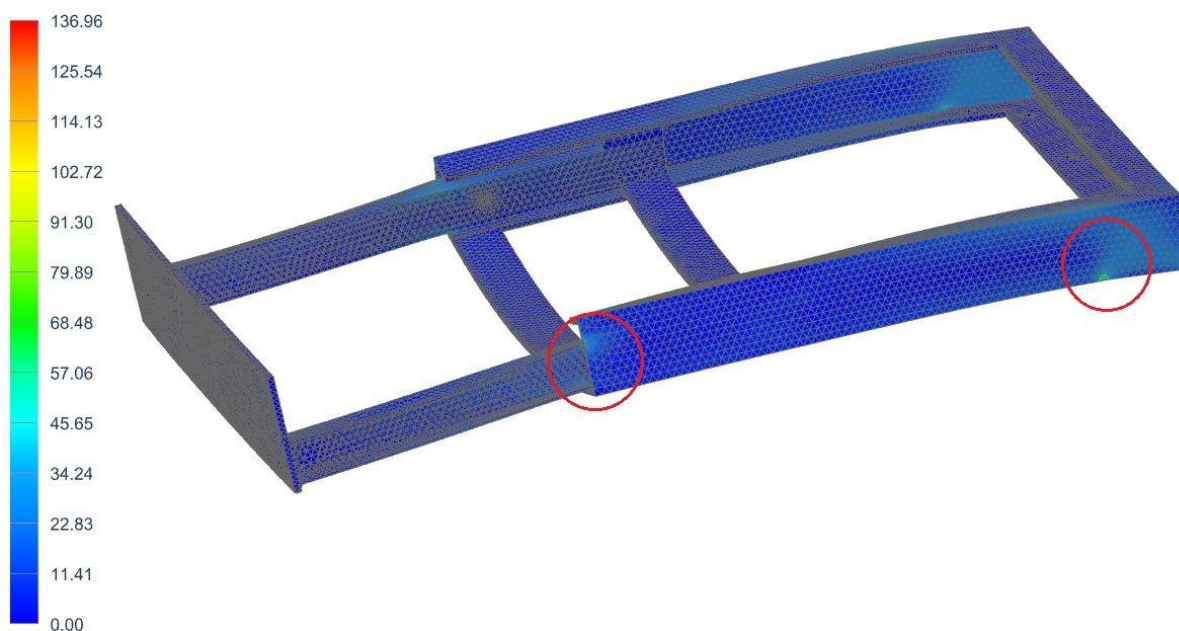
4.1 FEM-analys av modul

Modulens bärande profiler samt utskjut och glidklossar ritades upp som 3D-modell i Siemens NX. Därefter utgick jag från denna modell i FEM-analysen. I analysen av modulen låstes denna fast på ett sätt som motsvarar monteringen på bärande balken. Lasten som applicerades var av storleken 4kN och denna lades längst ut på utskjutet för att motsvara ett worst-case scenario. Materialet som valdes för analysen var Aluminium AW-6061 som liknar både 6082 och 6063 väldigt mycket. Figur 14 visar hur modellen var uppbyggd samt hur kraften och låsningarna applicerades för att kunna simulera modulen. De blåa linjerna representerar fastlåsningen av modulen och de röda pilarna visar var och i vilken riktning kraften är applicerad. De ljusgröna cirklarna representerar kontaktytor mellan modulens olika komponenter.



Figur 14. Låst och belastad modul

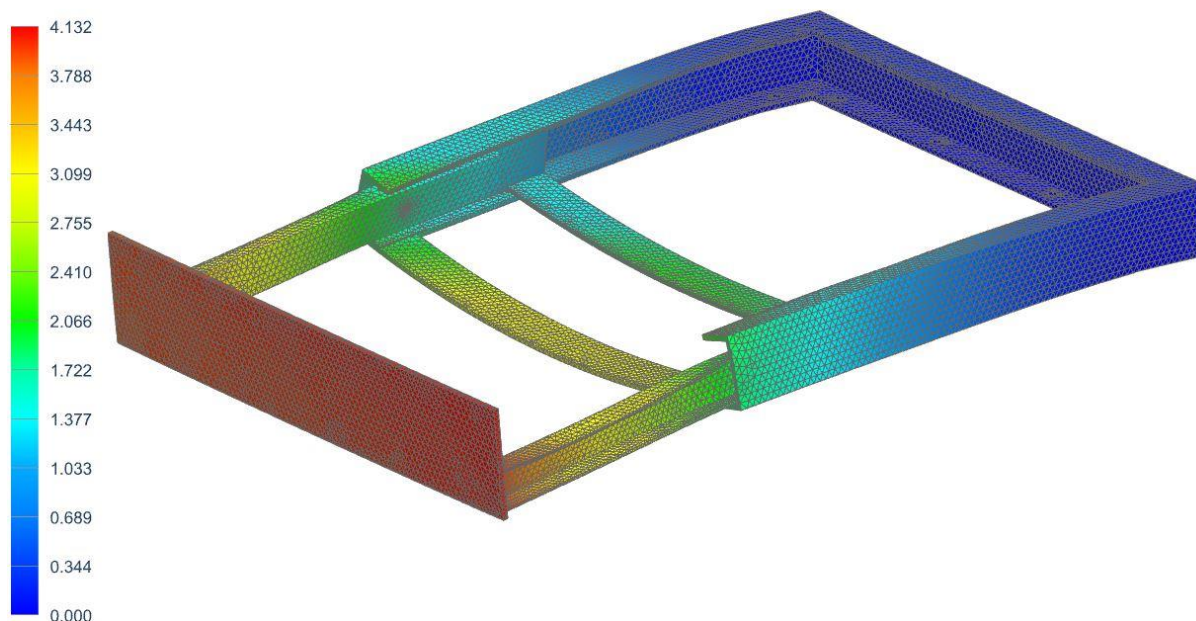
Modul bak_sim1 : Solution 1 Result
 Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
 Stress - Element-Nodal, Unaveraged, Von-Mises
 Min : 0.00, Max : 136.96, Units = N/mm²(MPa)
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Figur 15. Spänningarnas placering och storlek.

Maxspänningarna som uppstår i modulen är inringade i figur 15. Från figuren kan alltså ses att största spänningskoncentrationerna uppstår i bärande ramens infästning närmast den bärande balkens kant samt i utskjutets kontaktyta mot bärande ramen. Jämför man med färgskalan kan man konstatera att spänningskoncentrationerna befinner sig på väldigt små områden av modulen. Från figuren kan också ses att området som försvagats av svetsning inte utsätts för särskilt höga spänningar (ca 50MPa). Detta på grund av hur modulen fästs vid bärande balken. Den maximala beräknade spänningen i denna analys är 137MPa och finns vid infästningen till bärande balken. Jämfört med sträckgränsen för materialet, 260MPa, ger detta värde en säkerhet på: $n = 1,9$. ($n = \sigma_s / \sigma_b$)

Modul bak_sim1 : Solution 1 Result
 Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
 Displacement - Nodal, Magnitude
 Min : 0.000, Max : 4.132, Units = mm
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



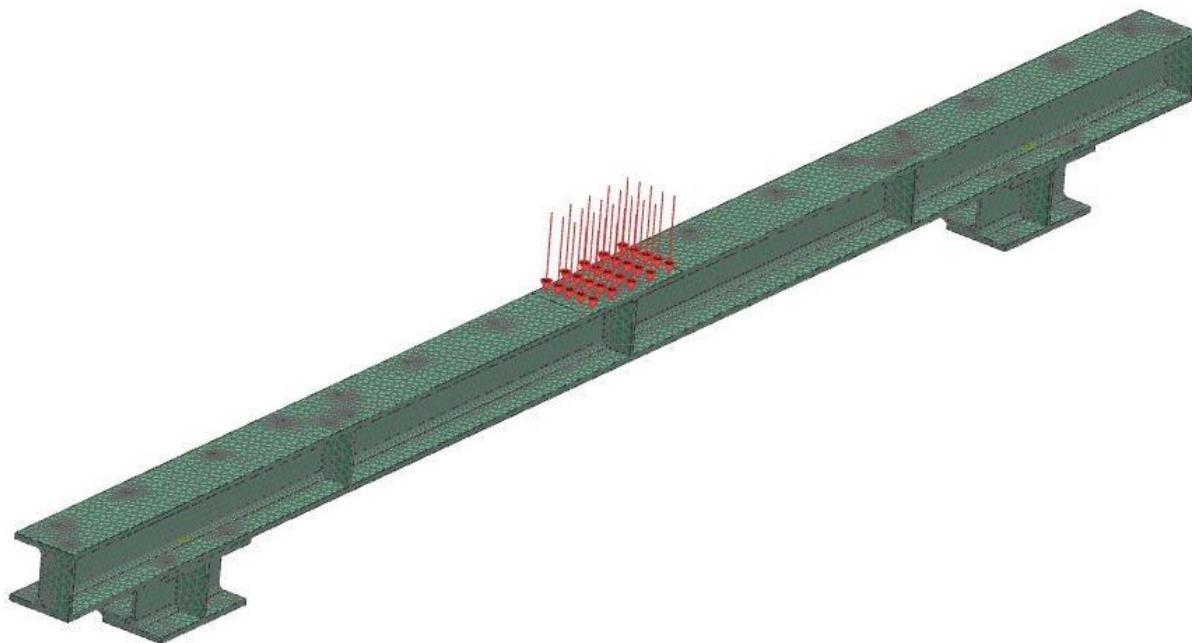
Figur 16. Deformationen av modulen

Förutom spänningarnas storlek och placering är det också viktigt att veta hur konstruktionen deformeras under last. I figur 16 ses modulens maximala deformation, i detta fall 4,1mm. Detta kan tyckas vara en rätt stor deformation men man bör ta i beaktande den låga elasticitetsmodulen som aluminium har samt den ”extrema” lastplaceringen. Maxspänningarna i modulen ligger ändå så långt under sträckgränsen att denna deformation inte blir permanent.

4.2 FEM-analys av bärande balk och infästning

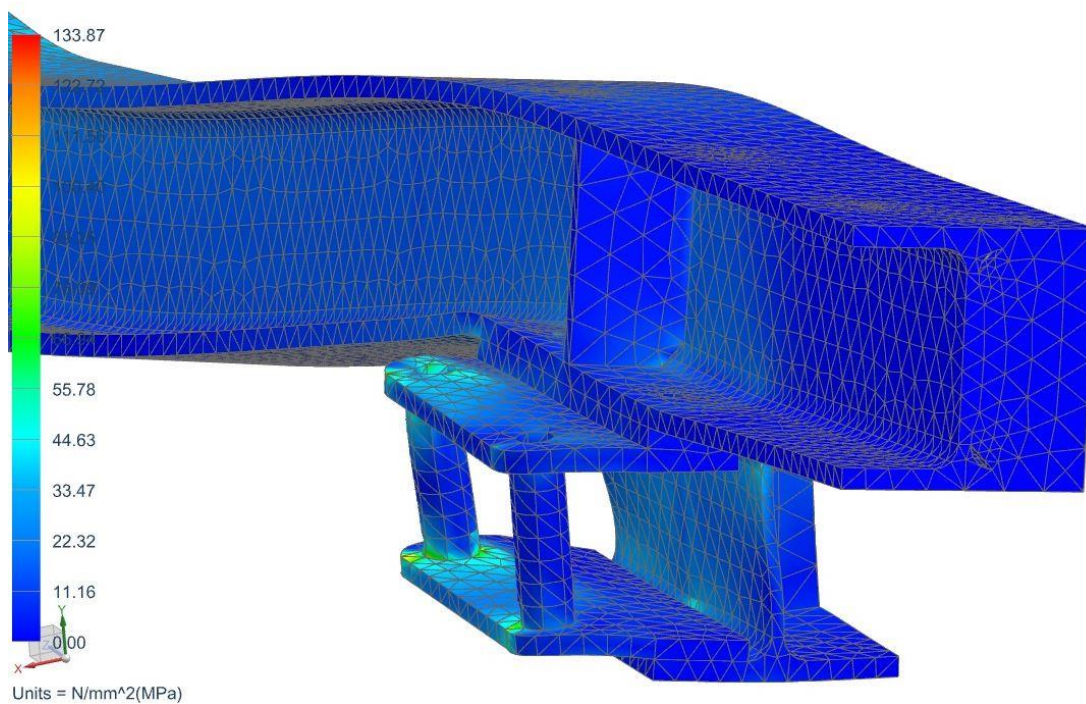
Precis som med plattformsmodulerna så modellerades dessa komponenter upp i Siemens NX.

Balken och infästningarna simulerades i två olika steg. I det första steget analyserades spänningar och deformation med avseende på en maximal last vid längsta avståndet från infästningarna, dvs. 1,5m. I figur 17 visas hur balken belastades. Lasten i det första steget valdes till 30kN som är lyftpelarnas maxkapacitet. Modellen låstes fast i fästplåtarna för infästningarna för att så nära som möjligt motsvara verklig installation.



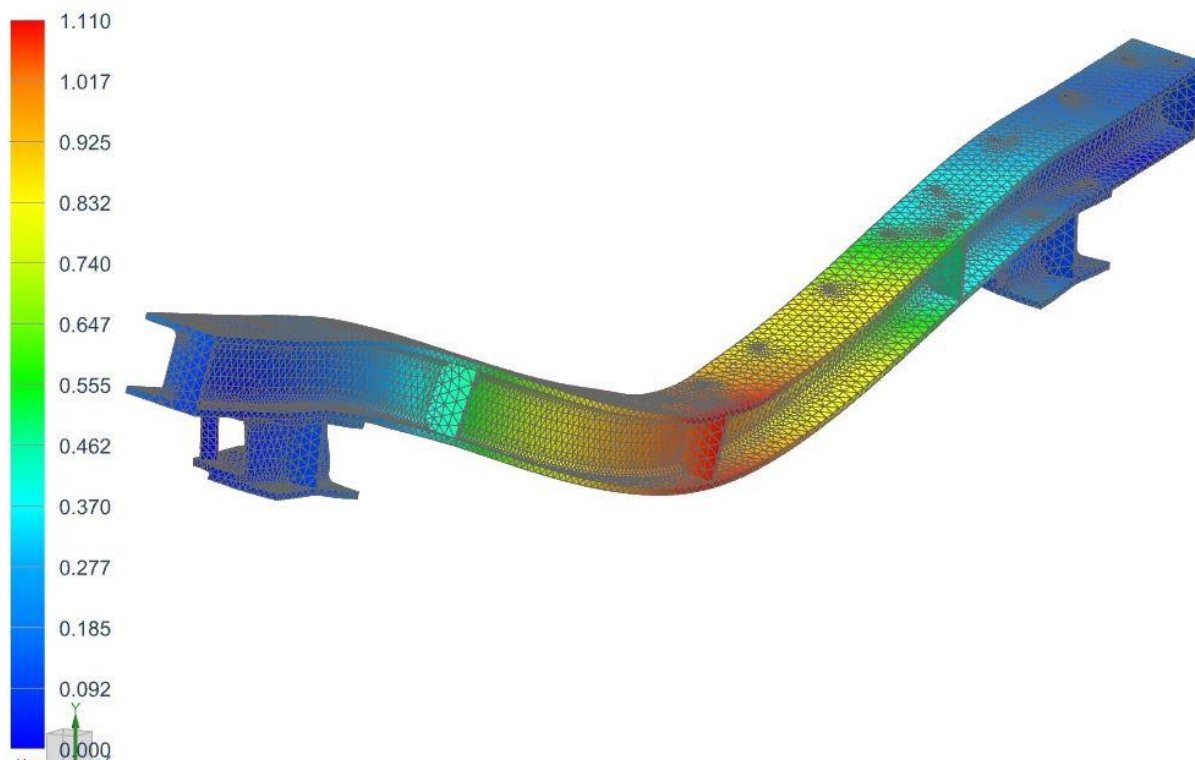
Figur 17. Låst och belastad bärande balk samt infästning

Barande balk_sim1 : Solution 1 Result
 Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
 Stress - Element-Nodal, Unaveraged, Von-Mises
 Min : 0.00, Max : 133.87, Units = N/mm²(MPa)
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Figur 18. Maxspänningar i bärande balk och infästning

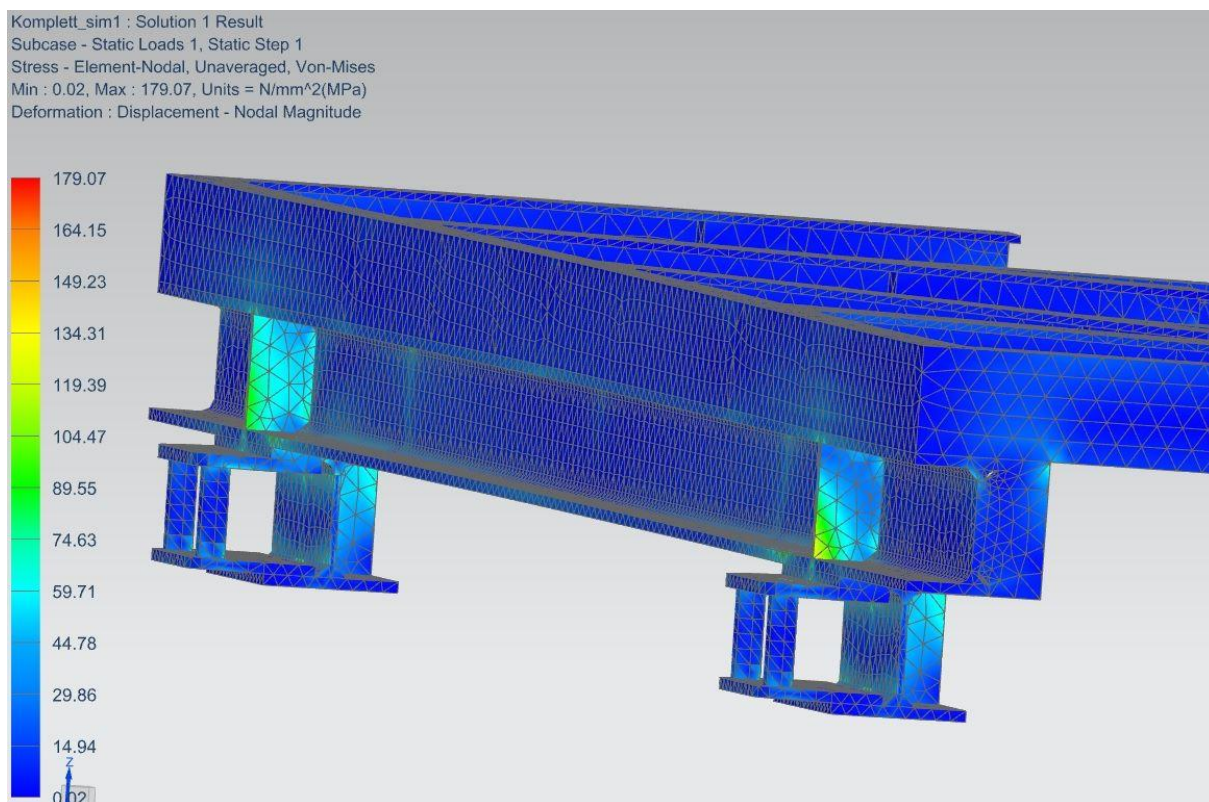
Barande balk_sim1 : Solution 1 Result
 Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
 Displacement - Nodal, Magnitude
 Min : 0.000, Max : 1.110, Units = mm
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Figur 19. Deformation av bärande balk

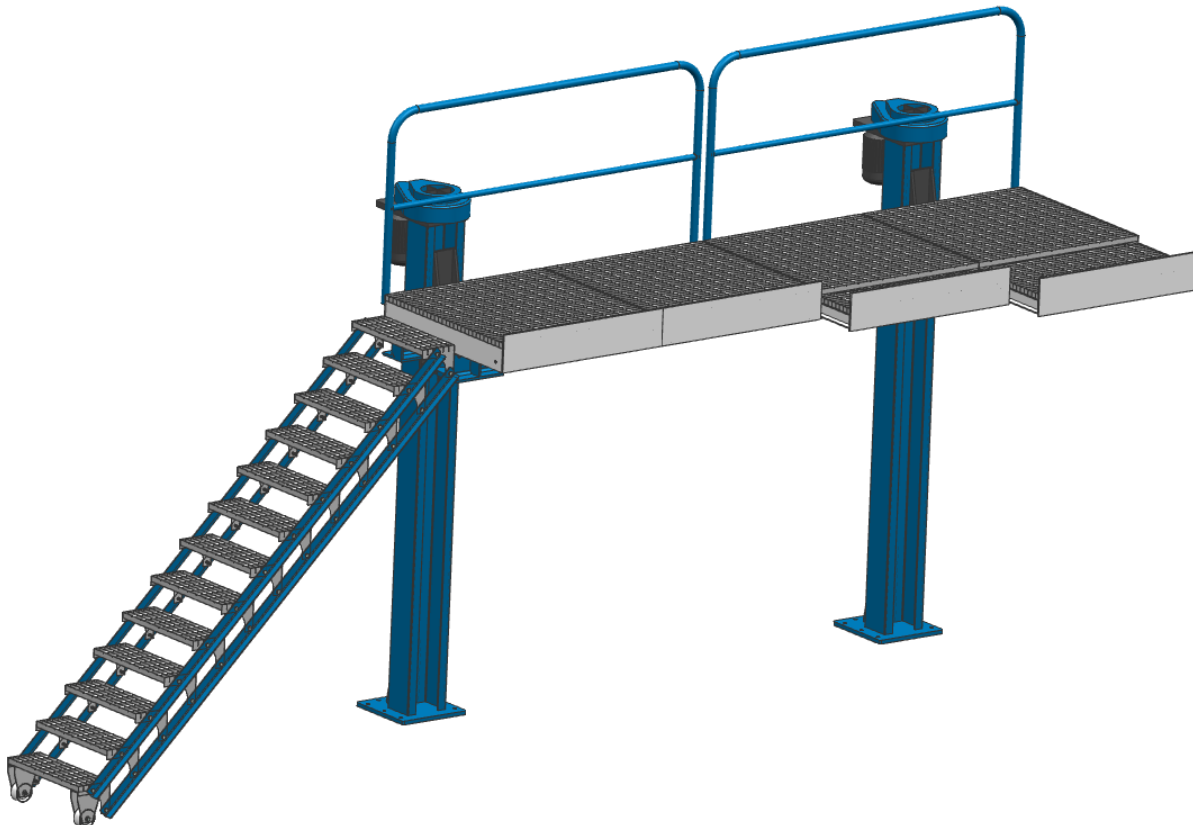
Figur 18 och 19 visar resultaten av det första steget. De största spänningskoncentrationerna uppstår i detta fall i själva infästningen, speciellt kring fästapparna, samt vid balkens vertikala förstärkningar. Den högsta spänningsnivån ligger på 134MPa. Jämfört med materialets sträckgräns, 355Mpa, ger detta en säkerhet på, $n = 2,6$. Deformationen av balken i den första simuleringen är 1,1mm.

I det andra steget analyserades balkens och infästningarnas spänningar och deformation med avseende på belastade moduler. Detta för att få en bild av hur det relativt stora vridmomentet som uppstår påverkar den bärande balken och infästningarna. Lasten som applicerades i denna simulering var 16kN, dvs. fyra moduler som är belastade med 4kN vardera. Låsningen var den samma som i den tidigare simuleringen. Som figur 20 visar uppstår de största spänningarna i de vertikala balkstöden. Största spänningarna som uppstår är 179 MPa. Det ger alltså en säkerhet på $n = 2$, med avseende på materialet sträckgräns som är 355MPa.



Figur 20. Maxspänningar vid modulbelastning

4.3 Slutgiltig design



Figur 21. Slutgiltiga designen på plattformen

Figur 21 visar den slutgiltiga versionen av plattformen. Kapaciteten på modulerna är 1600kg, d.v.s., 400kg per modul. Egenvikten på plattformen (bärande balk + moduler) är 460kg. Lyftpelarnas kapacitet är 3000kg. Detta innebär att det finns kapacitet att förstora plattformen med fler moduler och på så vis anpassa plattformen till både längre och kortare motorer. Plattformens bredd kan justeras med hjälp av utskjutet (max 0,5m). Maximala lyfthöjden begränsas av lyftpelarna och är i det här fallet 2,3m. Trappan är konstruerad så att den följer med plattformen vartefter den höjs eller sänks (dvs. trappans vinkel ändras)

Alla komponenter på plattformen (inklusive trappa och skyddsräcken) är fästa med skruvar vilket leder till att man enkelt och snabbt kan montera upp eller ned plattformen efter behov.

5 Diskussion

Resultaten av detta arbete samt tillvägagångssätten kommer i detta kapitel att diskuteras och utvärderas. Utformningen av plattformen, materialval och FEM-analysen kommer att tas upp. I slutet av kapitlet kommer även förslag till fortsatt utveckling att ges.

5.1 Plattformens utformning

Utformningen av den ställbara plattformen är något som har vuxit fram under arbetets gång. Från att det blev klart vad examensarbetet skulle handla om tills att den färdiga designen godkändes har varit en relativt lång process. Detta för att kunna optimera plattformens funktion och hållbarhet. En stor hjälp har varit erfarna montörer och konstruktörer som har kunnat ge vettig input på vad som kan och inte kan göras. Den slutgiltiga designen av plattformen är en som uppfyller alla de krav som ställdes från starten av examensarbetet.

Valet att konstruera plattformens moduler i aluminium är något som har påverkat detta arbete mycket. Egenskaperna skiljer sig mycket mellan aluminium och stål när det kommer till konstruktion och det är ett material som jag personligen inte har kommit i kontakt med tidigare när det gäller konstruktionsberäkningar etc. I utbildningssammanhang är det oftast vanliga konstruktionsstål man använder när man räknar olika uppgifter. Det har varit utmanande att försöka lära sig hur man kan använda aluminium för att konstruera på ett

vettigt sätt. Detta beror förstås inte bara på materialets egenskaper utan också på att utbudet av olika mått på profiler, balkar och stänger är betydligt mindre än för vanligt konstruktionsstål (S235, S355).

5.2 FEM – analysen

Finita elementanalysen utfördes för att få en överskådlig bild över hur stora spänningar och deformationer som uppstår samt var dessa befinner sig på konstruktionen. Användningen av 3D-programmet Siemens NX och FE metoden har varit till mycket stor hjälp eftersom det väldigt snabbt syns om spänningar och deformationer verkar rimliga. Värt att nämna är att programmet automatiskt skalar upp deformationer med skalan 10:1 för att man skall se deformationen och dess rörelsemönster tydligare. Därför kan figurena som visar analysresultaten se aningen vådliga ut.

Dock bör här nämnas att resultaten av FEM-analyserna bör ses som riktgivande snarare än exakta. Detta beror på att man inte exakt kan simulera verkliga förhållanden såsom fastmontering, svetsar och belastning utan man gör istället uppskattningar och försöker efterlikna verkliga förhållanden. Alla simuleringar i detta arbete har gjorts för så kallade worst-case scenarion. I verkligheten kommer denna plattform knappast någonsin att utsättas för något av dem.

5.3 Fortsatt utveckling

Denna arbetsplattform kommer att behöva utrustas med belysning, eluttag, tryckluft etc. En bra fortsatt utveckling kunde vara att lösa hur dessa system skall implementeras i plattformen. Problemet uppkommer i och med att plattformen är rörlig. Övergången från denna plattform till övriga plattformar kring motorn är också något som måste lösas. Detta för att man säkert skall kunna röra sig mellan olika plattformar.

Källförteckning

ESAB, (2010), *Svetshandbok för tillsatsmaterial*, (upplaga 16), Göteborg: ESAB AB

Heinze P., Schmidt I., (2012), *Finite Element Method an Introduction*, Hochschule Wismar

Introduction to Finite Element Analysis (2010)

www.nafems.org/downloads/working_groups/etwg/intro_to_fea.pdf/ (hämtat 15.4.2014)

Johannesson, H., Persson, J.-G., Pettersson, D., (2004), *Produktutveckling*, Stockholm: Liber AB

Lukkari, J., (2001), *Alumiinit ja niiden hitsaus*, Helsinki: Metalliteollisuuden Keskusliitto

Mathers,G., (2002), *The welding of aluminium and its alloys*, Cambridge: Woodhead publishing limited

Olsson, K.-O., (2006), *Maskinelement*, Stockholm: Liber AB

SFS-EN 1999-1-1 Eurocode 9 - Design of aluminium structures, (2007), Helsinki: Suomen Standardisierungsliitto

This is Wärtsilä

<http://wartsila.com/en/about/company-management/overview> (hämtat 23.10.2013)

TIG-svetsning

www.esab.se/se/se/support/upload/Tigsvetsning.pdf (hämtat 16.2.2014)

Valtanen, E., (2010), *Tekniikan taulukkokirja*, (upplaga 18), Mikkeli: Genesis-kirjat